

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Российская академия наук

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машинovedения им. А.А. Благонравова Российской академии наук**

Научный Совет РАН по машиностроению

Межведомственный научный совет по трибологии

Российский национальный комитет по теории механизмов и машин

Ассоциация инженеров-трибологов России

ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ

XIV Международная научно-техническая конференция,
посвященная 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова

Сборник трудов конференции

*Proceedings of XIV International scientific conference
«Tribology for Mechanical Engineering»,
dedicated to the 100th anniversary of the birth of A.P. Semyonov*

12 - 14 октября 2022 года

Москва

УДК [531.43/.46+621.89](063)

ББК 34.413

T67

Главный редактор: Буяновский И.А.

Ответственный редактор: Самусенко В.Д.

Редакционная коллегия: Албагачиев А.Ю., Бирюков В.П., Куксенова Л.И., Прожега М.В.,
Стрельникова С.С., Хрущов М.М., Цуканов И.Ю.

T67 Трибология – машиностроению: Труды XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова – М.: ИМАШ РАН, 2022. – 322 с.

ISBN 978-5-904282-15-8

В сборнике представлены статьи участников XIV Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению», посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова, проходившей с 12 по 14 октября 2022 года в ИМАШ РАН. На конференции были представлены результаты новых исследований в областях как теоретической, так и прикладной трибологии, которые выполнены отечественными и зарубежными специалистами за последние годы.

Основные направления работы конференции: фундаментальные проблемы трибологии, смазка и смазочные материалы, конструирование и расчёты узлов трения, трибологическое материаловедение, трибодиагностика и трибомониторинг, экологические проблемы трибологии, микро- и нанотрибология.

Сборник рассчитан на научных работников и специалистов, конструкторов и технологов, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией машин, оборудования и приборов.

ББК 34.413

УДК [531.43/.46+621.89](063)

Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

ISBN 978-5-904282-15-8

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), 2022

АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ СЕМЕНОВ

1 сентября 2022 года исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося отечественного учёного, крупнейшего специалиста в области трения, износа и смазки машин, триботехнического материаловедения, технологии нанесения износостойких и антифрикционных покрытий и сварки металлов в твердом состоянии, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Александра Павловича Семенова. Вся его жизнь, вся его плодотворная деятельность как учёного, исследователя и создателя новых высокоэффективных триботехнических материалов и технологий их получения, а также новых методов исследования трибологических характеристик этих материалов, была связана с Институтом машиноведения Академии наук СССР (ныне Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук).

Выпускник МАТИ военных лет (он совмещал учёбу с работой на оборонном предприятии – авиационном заводе в Омске), А.П. Семенов, пришел работать в ИМАШ РАН в 1949 году после окончания аспирантуры ИХФ АН СССР и работал в нём до конца жизни. За время работы в ИМАШ, а это более 60 лет, А.П. Семенов прошел путь от младшего научного сотрудника Лаборатории износостойкости Института, где он работал под руководством знаменитого основателя авторитетной отечественной школы трибологии, проф. М.М. Хрущова, до одного из ведущих учёных ИМАШа. В 1952 г. он защитил кандидатскую диссертацию, а в 1964 г. – докторскую. Александр Павлович был одним из первых молодых советских ученых, в самый разгар «холодной войны» получивших возможность длительной стажировки за рубежом в лабораториях Кембриджского университета (Великобритания) под руководством великого Френка Филиппа Боудена.

В 1972 г., после смерти М.М. Хрущова, из Лаборатории износостойкости выделилась Лаборатория исследования износа при высоких температурах. А.П. Семёнов был её создателем и первым руководителем. В последние годы жизни он в качестве главного научного сотрудника этой лаборатории, невзирая на ухудшение состояния здоровья, активно продолжал свои исследования практически до конца жизни.

А.П. Семенову принадлежат фундаментальные исследования и разработки, результаты которых получили высокую оценку научной общественности



Александр Павлович Семенов (01.09.1922 – 30.07.2019 гг.)

и широкое внедрение в различных отраслях машиностроения. К числу основополагающих работ А.П. Семенова относится энергетическая теория схватывания, которая позволяет управлять этим явлением при трении и в технологических процессах соединения металлов холодной и прессовой сваркой, совместной прокаткой, сваркой трением и другими способами твердофазной сварки. А.П. Семеновым выполнены обширные уникальные экспериментальные исследования трения, адгезии и контактного эвтектического плавления различных классов тугоплавких износостойких материалов при температурах до 2000 °С в вакууме и различных газовых средах. Выполненные проф. А.П. Семеновым исследования внесли значительный вклад в развитие теории трения и износа, триботехнического материаловедения, технологических процессов соединения материалов в твердом состоянии и нанесения износостойких и антифрикционных покрытий вакуумными ионно-плазменными методами. Разработанные им методы исследования адгезии материалов в различных условиях до сих пор активно применяется в практике современных трибологических лабораторий. Его научная деятельность была тесно связана с практикой – результаты многих его исследований были доведены до крупномасштабного внедрения в различных отраслях машиностроения. Так, разработанные при

его участия биметаллические подшипники из стали и алюминиевого антифрикционного сплава широко применяются в двигателях сельскохозяйственных машин и в агрегатах других отраслей техники. Благодаря этому повысились служебные характеристики подшипниковых узлов и была обоснована экономия ряда дефицитных материалов.

Следует отметить, что Александр Павлович в течение всей жизни особое внимание уделял повышению эффективности антифрикционных характеристик подшипников скольжения. В ряде публикаций он обосновывал рациональность организации промышленности для производства этих подшипников, по типу производства подшипников качения. Одной из последних его работ было создание новой вакуумной ионно-плазменной технологии изготовления подшипников скольжения. Разработанные А.П. Семеновым металлофторопластовые и металлополимерные подшипники скольжения с большим техническим и экономическим эффектом применяются в авиации, автомобилестроении, легкой и пищевой промышленности, при производстве электродвигателей погружных насосов для добычи нефти, турбокомпрессорах и высоковольтной аппаратуре. Как руководитель этих работ, Александр Павлович был в 1984 г. удостоен звания Лауреата премии Совета Министров СССР "За разработку материала и способов изготовления металлофторопластовых подшипников и широкое внедрение их в различные отрасли промышленности".

Свои пионерские исследования Александр Павлович описал в 330 научных публикациях, в том числе в 14-ти монографиях и брошюрах, в 48 патентах и авторских свидетельствах. Широкое признание специалистов получили монографии А.П. Семенова «Схватывание металлов» (1958), «Технология изготовления и свойства содержащих фторопласт антифрикционных материалов» (1963), «Металлофторопластовые подшипники» (1976), «Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторополимеров» (1981), «Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах» (1972), «Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами» (1974), «Высокотемпературное трение окисных керамик на основе корунда» (1974), «Обработка газовых подшипников с применением ионного распыления» (1976), «Смазочные покрытия газодинамических подшипников» (1981) и другие. Он является членом авторских коллективов, подготовивших три тома «Энциклопедии Машиностроения», справочник

«Конструкционные материалы», коллективные монографии «Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии», «Современная трибология: Итоги и перспективы» (2008), «Методы упрочнения поверхностей деталей машин» (2007).

Его научные труды были широко известны также за рубежом. Он неоднократно достойно представлял советскую науку за рубежом, участвуя во многих международных конференциях и симпозиумах.

Большое внимание Александр Павлович уделял подготовке высококвалифицированных специалистов для различных отраслей отечественной промышленности – его ученики защитили 15 кандидатских и 2 докторских диссертации.

В течение ряда лет профессор А.П. Семенов был членом Экспертного совета ВАК по проблемам «Машиностроение и машиноведение», членом Ученых советов Института машиноведения и металлургии РАН, ВНИИЖТ (ЦНИИ МПС). Он являлся членом Научного совета РАН «Трение и смазка» и Межведомственного научного совета по трибологии, членом редакционных коллегий журналов «Проблемы машиностроения и надежности машин» и «Трение и износ». Много лет Александр Павлович активно сотрудничал с редакциями этих журналов, а также журналов «Вестник машиностроения» и «Трение и смазка в машинах и механизмах», регулярно публикуя в них свои статьи и выступая в качестве рецензента.

А.П. Семёнов пользовался высочайшим авторитетом научного сообщества, как в России, так и за рубежом. Его научная деятельность была отмечена рядом правительственных наград и званием Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

Те, кому посчастливилось работать или даже просто контактировать с Александром Павловичем, с благодарностью вспоминают его как принципиального ученого, строгого, но доброжелательного руководителя, авторитетного старшего товарища, отзывчивого, всегда готового помочь ценным советом или практически, верного друга и надежного товарища. Для молодых научных работников проф. А.П. Семёнов может служить прекрасным примером настоящего учёного, его преданности науке, его врожденной интеллигентности, его истинного патриотизма.

Столетию со дня рождения этого выдающегося учёного и замечательного человека посвящается наша Конференция.

СЕМЕНОВ А.П. ГЛАЗАМИ ДОЧЕРЕЙ

Семенова Н.А.

E-mail: semenovanina@yandex.ru

Эта статья составлена из наших с сестрой (Семенова Нина Александровна и Семенова Ольга Александровна) воспоминаний, рассказов отца и семейных преданий.

Отец родился в Сибири на станции Юрты Тайшетского района Иркутской области.

Наш дед Павел Алексеевич Семенов родился в деревне Судьбище, Студенецкой Волости, Самарского уезда. Он был одним из 5 сыновей богатой крестьянской семьи (200 десятин земли, 100 голов скота), его одного отправили учиться после церковно приходской школы. Он окончил реальное училище и 2 курса Петровской Сельхозакадемии, в марте 1917 зачислен во 2-ой студенческий батальон в городе Нижний Новгород, с этим батальоном он и отступал в Сибирь, попал в плен к красным и ждал расстрела. Спас его Борис Павлович Позерн (известный революционер-большевик), с которым дед работал зимой 1916-1917 года по обеспечению войск, и который очень хорошо к деду относился.

Моя бабушка Прасковья Алексеевна Исаева родилась на станции Разгон Енисейской губернии в семье путевого обходчика. Она самостоятельно училась грамоте (брала в течение нескольких месяцев уроки у какого-то ссыльного). В 18 лет начала работать на железной дороге (рабочей) и подрабатывала, собирая в тайге и продавая ягоды. Поднакопив денег, поехала в город Тайшет, где брала уроки у учительницы. Сдала экзамены за 6-ть классов, выучилась на телеграфистку (морзистку) и работала всю гражданскую войну телеграфисткой в Сибири на железной дороге.

Дед и бабушка поженились в ноябре 1920 года, а зимой 1922-1923 дед перевез семью на родину, а сам отправился на поиски работы. В деревне отец и его старшая сестра Лида заразились туберкулезом.

Семья перебралась в Майкоп и после этого долгие годы жила в разных городах Кавказа (Майкопе, Туапсе, Ростове, Ессентуках, Орджоникидзе).

Отец выучился читать, когда учили Лиду (старшую сестру), книгу он при этом видел вверх ногами, и какое-то время он так и читал, потом бабушке пришлось его переучивать. Отец рассказывал какой он устроил рев, когда Лиду в 1929 году стали отдавать в школу, а его не хотели брать, родителям пришлось отвести в школу их

**SEMENOV A.P., HIS DAUGHTERS ABOUT HIM
Semanova N.A.**

обоих. Оказалось, что им в первом классе делать нечего и их зачислили сразу во второй класс. С тех пор до 1938-го года они с сестрой учились всегда в одном классе. Тетка потом рассказывала, что все домашние сочинения она писала за него, а он делал за нее математику.

С мая 1930 года по лето 1934 года семья жила в Ростове-на-Дону, время было сложное и тяжелое. В результате коллективизации многие крестьяне были высланы. В деревнях и станицах начался голод. В городе появилось много беспризорников. Особенно тяжелым был 1932 год, спаслись тыквами, которые бабушка запасла осенью и тем, что дед привозил из командировок на Кавказ. С тех пор у отца появилось очень бережное отношение к еде, оно передалось нам с сестрой.

В 1938 году отец окончил школу, но было ему тогда всего 15 лет, поступать в институт можно было только по особому разрешению, и директор школы посоветовал оставить Шурика в 10 классе на второй год. По рассказам отца он большую часть времени провел вместо учебы в горах, занимаясь охотой, но кончил с аттестатом с одними пятерками.



Рис. 1. Семенов А.П. после защиты диплома

В 1939 году он поступил в МАИ, но его взяли на экономический факультет. Он был возмущен до глубины души и ушел в Автодорожный, но осенью появилась возможность перейти в МАИ на самолетостроительный факультет. Он очень старался и за первое полугодие получил все

пятерки, его фотографию даже поместили на доску почета (одного из 140 человек). В 1940 году организовали МАТИ и несколько групп из МАИ перевели туда, так что отец стал студеном МАТИ.

Война 1941 года застала его на практике на авиационном заводе в Тушино. Он записался в ополчение, но дирекция завода оказалась проворнее, и студентов оформили как штатных работников (забронированных). Теперь они принадлежали заводу и даже на фронт их не могли отправить. Всякая попытка сбежать с завода считалась дезертирством, наказываемым в военное время расстрелом.

В начале июля был приказ об эвакуации авиационных заводов из Москвы. Каждому выдали бумагу о том, что они командируются для выполнения специального правительственного задания. Эта бумага, кстати, помогла отцу в июле мгновенно получить новые очки взамен сломавшихся.

После этого началась тяжелая работа по демонтажу оборудования и погрузке его в вагоны. Техники практически не было и большинство операций выполнялись вручную. Эвакуировали их в Омск, там они разгружали эшелоны, таскали станки, бетонировали полы в цехах. В конце сентября 1941 года на завод пришло распоряжение: всех студентов вузов, имеющих отношение к военной промышленности, вернуть (из армии, с заводов) для продолжения учебы. Отец рассказывал, что одного из их студентов вернули из партизанского отряда на самолете.

Потом снова была эвакуация в Сибирь, в Новосибирск. Летом 1942 года студентов направили на работы по расширению Новосибирского аэродрома (отец работал землекопом). Аэродром готовили к приему воздушных поездов (бомбардировщиков с прицепленными к ним двумя большими транспортными планерами), летевших с грузами из США через Аляску. Летом 1943 года институт вернули в Москву. Ну а летом 1944 года они отправились на лесоразработки недалеко от Кимр. Дрова вывозил по лежневке (две колеи из бревнышек) на трехтонке. Команда грузчиков, в которую входил отец, состояла из четырех человек. Шофер был неопытный, лежневка из-за дождей была скользкой и колеса груженой машины часто с неё соскальзывали. Сначала они пытались поставить машину на лежневку с помощью ваги (и иногда это им даже удавалось). Большой же частью намучившись, машину разгружали, ставили ее опять с помощью ваг на лежневку и опять нагружали. Отец рассказывал, как было обидно, когда

автомобиль, проехав несколько метров, снова съезжал с лежневки. После возвращения в Москву студенты добывали необходимые для пропитания средства разными погрузочно-разгрузочными работами (грузили дрова, уголь, станки). В конце 1944 года отец стал работать в прессовой Лаборатории Института лаборантом. Они монтировали в лаборатории пресса. В 1945 году отец окончил МАТИ. После защиты дипломной работы его оставили в Институте и рекомендовали в аспирантуру. Поступил сначала в аспирантуру на кафедру органической химии. Заболел в 1946 году туберкулезом и химию ему порекомендовали оставить.

Следующая попытка сделать диссертацию по штамповке деталей реактивных двигателей не увенчалась успехом – тему не стали финансировать. В это время совершенно случайно ему предложили место младшего научного сотрудника в Институте машиноведения АН СССР. Эта случайность определила дальнейшую научную карьеру отца на всю жизнь. Руководил Отделом трения и износа профессор М.М. Хрущов. Поступил отец на работу 30-го сентября 1949 года. Сначала осваивался, привыкал к незнакомой тематике, но получив собственную тему быстро сделал и защитил кандидатскую диссертацию в конце мая 1952 года.



Рис. 2. Семья отца: сестра с мужем, родители, он сам 1948 год

В сентябре 1958 года отца направили по обмену на 9-ть долгих месяцев в Англию в Империл Колледж. Отец отчаянно тосковал в Англии, часто присылал письма с рисунками для нас (он очень хорошо рисовал, даже в свое время помогал своей сестре сделать дипломную работу, тетя была профессиональным художником). В июне 1959 года вернулся в Москву. Из Англии отец привез много слайдов, немного носильных вещей и потрясающие игрушки для нас (мягких диснеевских

персонажей с проволокой внутри). Поездка эта была несчастливой для нас – отец отравился ртутью, и это привело к тяжелой форме астмы. С тех пор отец не расставался с ингалятором.

В 1964 году отец защитил докторскую диссертацию. Он просил отпуск на три месяца для оформления диссертации, но проф. М.М. Хрущов и академик А.А. Благоднаров предложили ему защищать диссертацию по совокупности научных работ (к этому времени он опубликовал три монографии и много статей). Это было рискованное мероприятие, против отца был собран мощный ударный кулак. Осторожный М.М. Хрущов даже советовал отцу снять работу с защиты. Отец решил драться до конца (в этом был весь он) и вышел на защиту 23-го декабря 1964 года. Защита шла с 9 утра до 19 вечера. Никто такой защиты никогда не видел. Выступающие за и против непрерывно чередовались. Большой зал в основном здании в Малом Харитоньевском переулке был переполнен. Много было людей из сторонних организаций. Многие сотрудники Института также были в зале (включая сотрудников отдела кадров, бухгалтерии, планового отдела). Все с азартом наблюдали за ходом защиты и не уходили до объявления результатов голосования. Несмотря на все старания противников, большинство членов Ученого совета проголосовало за присуждение отцу докторской степени. Отец запретил маме присутствовать на защите, и мы помним, как она переживала и как кидалась на каждый звонок телефона. Стенограмма защиты до сих пор хранится в семье, и ее читали его внуки.



Рис. 3. Мама с отцом свадебная фотография

Вообще все увлечения отца, кроме его работы, были связаны с живой природой, так что мы удивлялись, почему он выбрал себе техническую специальность. Он был страстным рыболовом и грибником, занимался садом. Однажды тетка объяснила это так: “У Шурика было два увлечения: растения и самолеты. Времена были такие, что чуть неурожай и сажают агронома, отец не пустил Шурика в сельхозакадемию”.

Для рыбной ловли отец вместе с нами выезжал на озера, сначала на Селигер, а потом на озеро Сельское под Торопцем. Отец ловил рыбу преимущественно на дорожку, блесна с крючком-тройником тянется на леске за лодкой, ловля на дорожку это несколько часов непрерывной гребли.

Каждый год наиболее удачливой оказывалась какая-то определенная блесна, в зависимости от того, какой рыбешкой в этом сезоне питались хищники. Отец делал блесны сам, на Селигер он брал с собой маленький тяжеленный ящичек, набитый свинцом, крючками, грузилами и т.п. Рыбак он был удачливый, привозил судаков и шук килограмма по три и больше, иногда попадались окуни.

Другим увлечением отца было собирание грибов. Во время грибного сезона отец каждый выходной выезжал из Москвы на пригородном поезде и отправлялся в лес. В лесу он чувствовал себя, как дома, отлично ориентировался, никогда не плутал. Он был отличный ходок, иногда сходил со станции одной пригородной ветки и за день проходил расстояние до станции другой пригородной ветки. Он знал все съедобные грибы, даже такие, которые никто не собирает. Когда мы с сестрой подросли, он стал и нас приучать к лесу, по выходным вытаскивал нас за город, осенью за грибами, весной на прогулку. Во время летних отпусков и каникул, когда мы выезжали на природу, мы почти каждый день надолго уходили в лес.

Отец был прирожденным исследователем, и для него были характерны нестандартные решения. Наша мама с молодых лет страдала ревматизмом. Отец узнал, что от ревматизма помогает пчелиный яд, написал в колхоз на Кавказ (кавказские пчелы считаются наиболее миролюбивыми), попросил помочь, и ему прислали пчелиную семью. Пчелы реально помогли, мама потом ставила их себе сама и улей с пчелами жил у нас в Москве на четвертом этаже, чтобы пчелы были всегда под рукой.

Отец ценил физическое движение. Все его увлечения – рыбалка, собирание грибов, работа на садовом участке – были связаны с физической нагрузкой. Мы даже и представить себе не можем, чтобы отец лежал на диване и смотрел телевизор. Больше всего он любил ходить пешком, машин терпеть не мог, и машина в семье появилась только в 2004 году.

Отец очень любил нас с сестрой. В детстве он заставлял нас делать зарядку, обливал холодной водой, зимой вытаскивал кататься на лыжах (сам очень любил лыжи, мог бегать подолгу). Когда после окончания школы сестра поступала на Биофак

МГУ, отец всюду её сопровождал; они вместе подавали документы, ходили на собрания абитуриентов.

Главным для него всегда была работа, он был рад, когда у меня появились дети, очень любил внуков, дожил до правнуков, но работа все равно всегда была на первом месте. Никаких орденов у отца не было. К шестидесятилетию ему присвоили звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», в этом же году он стал Лауреатом премии Совета Министров СССР (как руководитель работ).



Рис. 4. Отец с мамой на даче с Ольгой, внуками и зятем (я фотографирую)

Интеллектуалом он не был, новинок не читал, в театр ходить не любил, любил классическую музыку, очень хорошо пел сам. Но вкус у него был великолепный: из тех фильмов, на которые нам удалось его вытащить, он больше всего ценил Солярис Тарковского и Остров Лунгина.

Отец был очень терпеливым и никогда не жаловался. Всю жизнь он страдал бронхиальной астмой и не расставался с ингалятором. Каждую ночь он просыпался от приступа удушья, я до сих пор поражаюсь его мужеству.

Он не любил лечиться, но и не боялся врачей, ко всем их рекомендациям относился как ученый, изучал совместимость лекарств, искал пути решения проблем и никогда не сдавался. Когда в 1946 году он заболел туберкулезом, он игнорировал все рекомендации врачей и играл в волейбол с зашкаливающей температурой. В конце жизни он почти совсем ослеп, видел только одним глазом и то плохо. Но он помогал сестре по хозяйству, мыл посуду, на мои попытки купить посудомойку он отвечал, что тогда ему будет нечего делать.

Отец немного не дожил до девяноста семи лет, но до конца жизни он полностью сохранил здоровый ум и твёрдую память. Легким характером он не отличался, но был надёжным как скала.



Рис. 5. Семенов А.П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЫ АРМИРОВАННОЙ СТАЛЬЮ ИЛИ БАЗАЛЬТОМ

Абрамов К.А. *, Шолом В.Ю., Поляков А.Б., Кодиров И.С.

*E-mail: k-abramov@rosoil.ru

ООО «ХТЦ УАИ», Уфа, Россия.

В статье исследуются композиционные материалы на основе алюминиевой матрицы, армированные сталью и базальтом. Материалы получены методом литья по выплавляемым моделям, в качестве матрицы выбран сплав АВ. Проведены испытания по определению противоизносных и противозадирных свойств, по результатам которых композиционные материалы показали себя значительно эффективнее в сравнении со сплавом без армирования.

Ключевые слова: композиционные материалы, алюминиевая матрица, литье по выплавляемым моделям, противоизносные свойства, противозадирные свойства.

Введение

Сегодня композиционные материалы (КМ) играют большую роль в промышленности. Такие материалы обладают выдающимися характеристиками: удельная прочность, теплопроводность, износостойкость, пластичность, электропроводность и т.д. Благодаря сочетанию различных компонентов удается достичь свойств материала, которыми не обладают компоненты по отдельности. Применение композиционных материалов позволяет снизить вес, повысить ресурс, выдерживаемые нагрузки и другие характеристики конструкций и изделий. При всех положительных качествах композитов они имеют и недостатки: высокая стоимость, сложная технология производства по сравнению с традиционными материалами. Применение новых способов изготовления позволяет снизить стоимость композиционных материалов, тем самым повысить целесообразность их использования [1]. Поэтому разработка новых КМ и технологий изготовления является актуальной задачей.

STUDY OF THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF A COMPOSITE MATERIAL BASED ON ALUMINUM MATRIX REINFORCED WITH STEEL OR BASALT.

Abramov K.A., Sholom V.Yu., Polyakov A.B., Kodirov I.S.

The article examines composite materials based on aluminum matrix, reinforced with steel or basalt. The materials were obtained by the method of casting according to investment models, the AB alloy was chosen as the matrix. Tests were carried out to determine the anti-wear and anti-scuff properties, according to the results of which composite materials showed themselves to be much more effective in comparison with the alloy without reinforcement.

Keywords: composite materials, aluminum matrix, steel reinforcement, basalt reinforcement, investment casting, antifriction material, antiwear properties, extreme pressure properties.

Материалы и методы

В качестве матрицы исследуемых композиционных материалов в данном исследовании выбран алюминиевый сплав АВ. Алюминиевый сплав АВ отличается среди сплавов системы Al-Mg-Si повышенным уровнем пределов прочности и текучести [2,3]. Химический состав алюминиевого сплава АВ приведен в таблице 1.

В качестве армирующих компонентов использовали мелконарубленные волокна базальта толщиной 7 мкм, длиной до 50 мм [4-6] и стальные волокна толщиной около 0,1 мм, длиной около 50 мм, из стали 08 [7].

Исследуемые композиционные материалы получали жидкофазным методом – литье по выплавляемым моделям. Такой метод литья позволяет обеспечить высокое качество поверхности, что позволяет получать качественные отливки без последующей механической обработки.

Табл. 1. Химический состав сплава АВ в % по ГОСТ 4784-97

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
до 0,5	0,5-1,2	0,15-0,35	до 0,25	до 0,15	0,1-0,5	0,45-0,9	до 0,2	95,95-98,80



Рис. 1. Армирующие элементы, уложенные в форму перед заливкой воском: а – базальт, б – сталь.

Процесс изготовления отливок заключался в укладывании армирующих элементов в специальные формы и заливке расплавленного воска. После этого получают восковки, формой будущей отливки. В армированных восковых образцах (восковках) внутри равномерно распределяли армирующие элементы из стали и базальта. Далее восковки помещаются в стальную опоку и заливали формовочной смесью. Опока с застывшей смесью помещается в печь для прокалики формы и выплавки воска. В результате получали формы из гипсовой смеси. Следующим этапом помещали форму в литейную машину, где находится расплавленный металл, и произвести заливку металла в форму. Температура опоки составляла 60°C, температура расплава 750°C, при литье в вакууме использовали флюс 67% NaF и 33% NaCl. Тигель с металлом находился над формой, заливка металла происходила благодаря поднятию штока тигля, который запирает отверстие на дне [8].

По такой же технологии был приготовлен образец без армирующих элементов.

Для определения плотности были изготовлены образцы формы параллелепипеда, у которых был измерены вес и объем.

Степень армирования отливок сталью или базальтом составляла 4-5% по массе. Плотность алюминиевого сплава АВ = 2,7 г/см³, плотность стальных волокон = 7,9 г/см³, плотность базальта = 2,6 г/см³ (таблица 2).

Противоизносные свойства материалов исследовали на машине трения, по схеме трения «образец-обойма», изображенной на рисунке 2. Обойма была изготовлена из стали ШХ-15, ролик (образец) из исследуемых материалов с армированием и без армирования. В испытательную ювлету заливалось моторное минеральное масло «Лукойл стандарт 10W40 SF/CC» для максимального приближения к среде работы вкладышей ДВС. Параметры испытаний варьировались в зависимости от определяемых показателей. Испытания по определению величины износа производили при нагрузках на образец 19,4, 35,7 и 52 кгс в течение одного часа.

Табл. 2. Результаты измерения плотности

Вид материала	Плотность, г/см ³
АВ, без армирования	2,67
АВ, армированный сталью	2,72
АВ, армированный базальтом	2,65

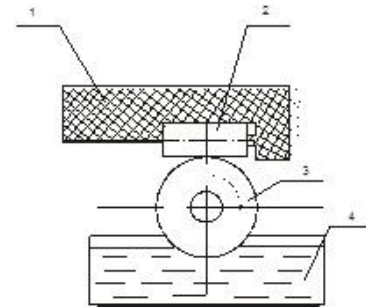


Рис. 2. Схема испытаний «образец - обойма». 1 – тefлоновая подложка; 2 – образец; 3 – кольцо; 4 – смазочная ванна.

Оценку противоизносных свойств определяли по времени заклинивания обоймы при определенной величине нагрузки на узел. При этом также оценивали величину износа. Такие испытания проводились без смазочного материала, для имитации масляного голодания ДВС. В данной работе приведены результаты испытаний при нагрузке на узел трения 84,6 кгс.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний по определению противоизносных свойств изображены на рисунке 3, где в процентах указано повышение противоизносных свойств у армированных образцов в сравнении с образцами без армирования.

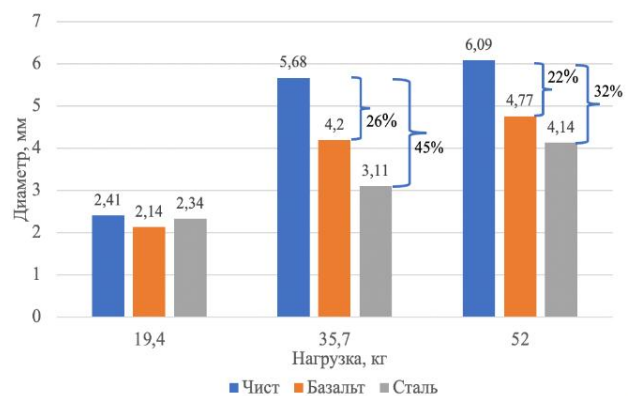


Рис. 3. Результаты испытаний по оценке противоизносных свойств исследуемых образцов в течение 1 часа.

Результаты испытаний показали, что у образцов армированные сталью величина износа на 32-45% меньше, чем у образцов без армирования, а у образцов, армированных базальтом на 22-26%.

При нагрузке 19,4 кгс наблюдается уменьшение величины износа у армированных образцов для базальта на 11%, для стали на 3% по отношению к образцу без армирования.

Результаты испытаний по оценке противозадирных свойств исследуемых образцов показаны в таблице 3 и на рисунках 4, 5 и 6.

Табл. 3. Результаты испытаний по оценке противозадирных свойств

Тип образца	Нагрузка, кгс	Время до заклинивания, сек	Величина износа (среднее значение), мм
Без армирования	84,6	3	6,52
Базальт		5	4,58 (29%)
Сталь		6	3,96 (39%)



Рис. 4. Внешний вид пятен износа и обоймы после испытаний образца без армирования при нагрузке 84,6 кгс



Рис. 5. Внешний вид пятен износа и обоймы после испытаний образца, армированного базальтом при нагрузке 84,6 кгс



Рис. 6. Внешний вид пятен износа и обоймы после испытаний образца, армированного сталью при нагрузке 84,6 кгс

В сравнении армированных материалов с материалом без армирования, лучше всего по противозадирным свойствам зарекомендовал себя материал, армированный сталью. При испытаниях без масла при нагрузке 84,6 кгс этот вариант показал износ меньше на 39% и в 2 раза увеличение времени до заклинивания. Материал, армированный базальтом при испытаниях без смазочного материала при нагрузке 84,6 кгс показал износ меньше на 29% и увеличение времени до заклинивания от 3 до 5 секунд. При этом у образцов, армированных базальтом и сталью задиров вокруг пятна износа и налипшего материала на обойме значительно меньше по сравнению с образцами без армирования.

Заключение

Разработана методика получения композиционного материала на основе алюминиевой матрицы, армированных сталью или базальтом методом литья по выплавляемым моделям.

Исследования по оценке триботехнических свойств образцов из алюминиевого сплава АВ, армированных базальтом и сталью, показали значительное улучшение противозадирных и противозадирных свойств по отношению к образцам из сплава АВ без армирования.

[1] Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам/ Дж. Любин, кн.1, – М.: Машиностроение, 1988. – 446 с.

[2] ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Введ. 2000-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 21 с.

[3] Авиаль [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?curid=360644&oldid=113407051> . — Заглавие с экрана. – (Дата обращения 01.06.2021)

[4] Effects of Si on the aging behaviour and formability of aluminium alloys based on AA6016 / S. M. Hirth [and etc.] // Materials Science and Engineering. – 2001. – V. 319-321. P. 452-456.

[5] Базальтовое волокно [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?curid=1475918&oldid=112099715>. — Заглавие с экрана. – (Дата обращения 01.06.2021)

[6] Базальт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?curid=42784&oldid=113575568>. — Заглавие с экрана. – (Дата обращения 01.06.2021).

[7] Стальная вата [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/?curid=7236175&oldid=105628272>. — Заглавие с экрана. – (Дата обращения 01.06.2021)

[8] Зборщик А.М. Специальные методы литья: конспект лекций /Зборщик А.М. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2007. – 158 с.

УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Алисин В.В., Рошин М.Н. *, Лукьянов А.И.

*E-mail: roschin50@yandex.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Приведены результаты трибологических испытаний углеродосодержащих материалов "Арголон-2D", "Хардкарб-ТП", "Хардкарб-ТПГ", "Углекон-Т" со сталью 40Х13 при температуре 300-700 °С, нагрузке 1,0 МПа и скорости 0,05 м/с. Лучшими антифрикционными свойствами обладает материал "Хардкарб-ТПГ", чем "Арголон-2D" и "Хардкарб-ТП", "Углекон-Т". В диапазоне температуры 400-500 °С нагрузки 1,0 МПа и скорости 0,05 м/с коэффициент трения материала "Хардкарб-ТПГ" изменяется в пределах 0,18-0,21.

Ключевые слова: трение, коэффициент трения, нагрузка, высокотемпературные испытания, контактное давление, УУКМ.

Введение

При создании новой техники, необходимой выполнять определенные функции в условиях высоких температур, необходимо обеспечить работоспособность механических подвижных узлов трущихся сопряжений в широком диапазоне температур. При создании узлов трения в отсутствии смазки необходимо обеспечить надежность узла трения с низким коэффициентом трения во всем температурном диапазоне эксплуатации [1,2]. Необходима разработка антифрикционных материалов способных работать при низких и высоких температурах. Повышение температуры в узле трения приводит к увеличению коэффициента трения, что влечет повышенный износ и повреждение поверхностей трения. Для повышения работоспособности техники в экстремальных условиях, например в среде высоких температур, обеспечивается применением в узлах трения новых теплостойких антифрикционных материалов. Обеспечение работоспособности узлов трения, использованием традиционных конструкционных материалов, не отвечает выполнению поставленных задач современной технике. При высоких температурах необходимы антифрикционные углепластики, которые могут повысить рабочую температуру в узле трения и увеличить ресурс работы изделия. Для повышения антифрикционности узла трения используют

CARBON-CONTAINING MATERIALS IN HIGH-TEMPERATURE FRICTION UNITS

Alisin V.V., Roshchin M.N., Lukyanov A.I.

The results of tribological tests of carbon-containing materials "Argolon-2D", "Hardcarb-TP", "Hardcarb-TPG", "Carbon-T" with steel 40X13 at temperatures of 300-700 °C, load 1,0 MPa and speed 0,05 m / s are presented. The material "Hardcarb-TPG" has better antifriction properties than "Argolon-2D" and "Hardcarb-TP", "Carbon-T". In the temperature range of 400-500 °C of 1,0 MPa load and a speed of 0,05 m/s, the coefficient of friction of the "Hardcore-TPG" material varies between 0,18-0,21.

Keywords: friction, coefficient of friction, load, high temperature tests, contact pressure, UCCM.

высокотемпературные смазки или твердые смазочные материалы и покрытия [3]. Для работы узлов трения в условиях высоких температур используют материалы на основе углеродосодержащих композиций (УУКМ) [4,5]. Материал УУКМ обладает экстремально низкой плотностью, хорошие характеристики прочности и стойкости к адгезионному схватыванию, высокая температурная стойкость определяют интерес к их применению в космических аппаратах (КА), особенно для обеспечения работоспособности узлов трения, например, механизмов поворота антенн, в условиях длительных полетов космических аппаратов в открытом космосе, где требуются материалы, которые кроме хороших антифрикционных свойств, должны обладать хорошей стойкостью к адгезионному схватыванию. В условиях высоких температур, например при полетах на планету Венера, требуется высокая термостойкость [6]. УУКМ применяются в двигателях КА и в конструкциях КА при движении в атмосфере при возвращении на Землю [7]. Углеродные композиты с углеродными нанотрубками применяются для изготовления неметаллических электрических проводников в токоъемниках в аэрокосмической технике, военной и других областях промышленности с целью одновременного повышения прочности и электропроводности [8].

Введение нанотрубок в УУКМ показывает увеличение прочности на растяжение в сравнении с композитом без углеродных нанотрубок. Изучено влияние nano частиц графита на микроструктуру, пористость, прочность на сдвиг, демпфирующую способность УУКМ [9, 10]. Установлено влияние ориентации волокон на триботехнические свойства УУКМ [11], изучен эффективность легирования азотом пористого УУКМ с нанотрубками [12]. Трибологические параметры материалов УУКМ для работы в узлах трения при высоких температурах изучены недостаточно, поэтому применение их сдерживается.

Цель работы – исследовать применение углеродосодержащих материалов в высокотемпературных узлах трения.

Материалы и методы исследований

Трибологические испытания проводились на образцах из объемно-армированных углеродосодержащих композиционных материалов марки:

- "Арголон-2D",
- "Хардкарб-ТП", изготовлен из углеродной ткани типа Саржа 2/2-1000-12К-400 (ПАН волокно),
- "Хардкарб-ТПГ", изготовлен из углеродной ткани типа Саржа 2/2-1000-12К-400 (ПАН волокно) с графитированием,
- "Углекон-Т".

При испытании пара трения состояла из образца углеродосодержащего композиционного материала и образца из жаропрочной коррозионностойкой стали 40X13. Испытания по определению трибологических параметров проводились на модернизированном высокотемпературном стенде ВТМТ-1000 [13]. На рис. 1 показана схема расположения образцов при испытании.



Рис. 1. Расположение образцов

Схема испытаний была выбрана «диск-палец». Испытания проводились при температур 300-700 °С, нагрузке 0,3-1,0 МПа и скорости скольжения 0,05 м/с. Параметры испытания должны отражать условия работы натурального узла трения. Выбранная схема испытаний «диск-палец» позволяет распространять результаты стендовых испытаний на другие схемы сопряжений. В процессе испытаний производилось измерение момента трения и температуры.

Результаты испытаний и обсуждение

При испытании материалов "Арголон-2D", "Хардкарб-ТП", "Хардкарб-ТПГ" и "Углекон-Т" в паре со сталью 40X13 при температуре 300-700 °С и скорости скольжения 0,05 м/с установлено, что с увеличением температуры коэффициент трения увеличивается для всех испытуемых материалов, рис. 1. Лучшими антифрикционными свойствами обладает материал "Хардкарб-ТПГ", чем «Арголон-2D», "Хардкарб-ТП" и "Углекон-Т". В диапазоне температур 300-700 °С коэффициент трения материала "Хардкарб-ТПГ" изменяется в пределах 0,20-0,24. При температуре 400 °С и нагрузке 1,0 МПа коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,3 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ", а при температуре 500 °С коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,7 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ". Зависимость коэффициента трения от нагрузки при температуре 400 °С и скорости 0,05 м/с материалов: "Арголон-2D", "Хардкарб-ТП", "Хардкарб-ТПГ", "Углекон-Т" приведено на рис. 3. При нагрузке 0,5 МПа коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,2 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ", а при нагрузке 1,0 МПа коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,26 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ".

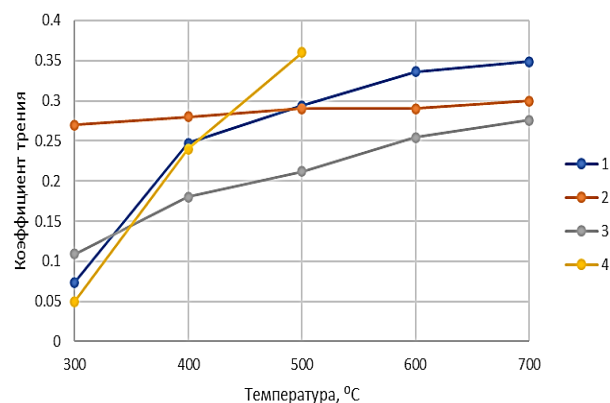


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от температуры при нагрузке 1,0 МПа и скорости 0,05 м/с материалов: 1 – "Арголон-2D", 2 – "Хардкарб-ТП", 3 – "Хардкарб-ТПГ", 4 – "Углекон-Т"

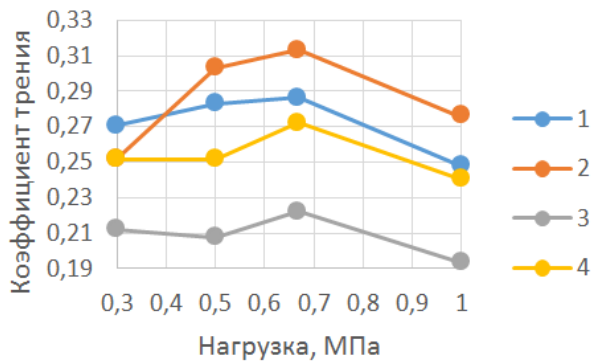


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от нагрузки при температуре 400 °С и скорости 0,05 м/с материалов: 1 – "Арголон-2D", 2 – "Хардкарб-ТПГ", 3 – "Хардкарб-ТПГ", 4 – "Углекон-Т"

Выводы

Проведенные исследования показали, что лучшими антифрикционными свойствами обладает материал "Хардкарб-ТПГ", чем "Арголон-2D", "Хардкарб-ТПГ" и "Углекон-Т". В диапазоне температуры 400-500 °С нагрузки 1,0 МПа и скорости 0,05 м/с коэффициент трения материала "Хардкарб-ТПГ" изменяется в пределах 0,18-0,21. При температуре 400 °С и нагрузке 1,0 МПа коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,3 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ", а при температуре 500 °С коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,7 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ". При нагрузке 0,5 МПа коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,2 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ", а при нагрузке 1,0 МПа коэффициент трения материала "Углекон-Т" в 1,26 раза больше, чем материала "Хардкарб-ТПГ". Полученные результаты предназначены для использования при проектировании узлов трения, работающих при высоких температурах.

- [1] Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т.2–8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с.
- [2] Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин): Учебник. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: "Издательство МСХА", – 2002, – 632 с.
- [3] Lobo T. A., Marchenko E. A. Effect of Substrate Condition on the Structural and Tribotechnical Characteristics of Molybdenum Diselenide (MoSe₂) Coatings //Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 844-848.
- [4] Новые материалы. Колл. авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М: МИСИС. – 736 с.
- [5] Бушуев В.М., Удинцев П.Г., Чунаев В.Ю., Ершова А.Н. Разработка и перспективы применения углеродных композиционных материалов в технологической оснастке, применяемой при проведении высокотемпературных процессов // Электрохимия. – 2003. – № 12. – С. 120-127.
- [6] Алисин В.В., Рощин М.Н., Лукьянов А.И. и др. Разработка и исследование узлов трения, работающих при высоких температурах, применительно к космическим аппаратам// Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2019. – № 1. – С. 61-65.
- [7] Gillard A. P. et al. Modeling of the non-linear mechanical and thermomechanical behavior of 3D carbon/carbon composites based on internal interfaces //Carbon. – 2019. – Т. 154. – С. 178-191.
- [8] Zhang S. et al. Carbon nanotube/carbon composite fiber with improved strength and electrical conductivity via interface engineering //Carbon. – 2019. – Т. 144. – С. 628-638.
- [9] Hou Z. et al. Densification kinetics and mechanical properties of carbon/carbon composites reinforced with carbon nanotubes produced in situ //Carbon. – 2016. – Т. 99. – С. 533-540.
- [10] Lim D. S., An J. W., Lee H. J. Effect of carbon nanotube addition on the tribological behavior of carbon/carbon composites //Wear. – 2002. – Т. 252. – №. 5-6. – С. 512-517.
- [11] Hutton T.J., Johnson D., McEnaney B. Effects of fibre orientation on the tribology of a model carbon-carbon composite //Wear. – 2001. – Т. 249. – №. 8. – С. 647-655.
- [12] Wan L. et al. ZIF-8 derived nitrogen-doped porous carbon/carbon nanotube composite for high-performance supercapacitor //Carbon. – 2017. – Т. 121. – С. 330-336.
- [13] Roshchin M.N. High-temperature installation for testing composite ceramic materials on the friction and wear behaviour //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1515. – №. 4. – С. 042050.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ GLW ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСЕЛ

Антошкин И.Ф., Алексеев А.П., Мусьякаев Р.З.

E-mail: aa@glwglobal.ru

ООО «МАСЛЯНЫЕ СИСТЕМЫ», Москва, Россия.

Компания ООО «МАСЛЯНЫЕ СИСТЕМЫ» предлагает готовые решения в области систем фильтрации любых типов промышленных масел. Области применения: суда флота, горнодобывающая промышленность, металлургия, бумагоделательная промышленность, автотранспорт, железнодорожный транспорт, строительная техника, энергетика, нефтяная промышленность.

Ключевые слова: очистка масла, фильтрация масла, масляный фильтр, уменьшение износа.

Введение

В современном обществе, заботящемся об окружающей среде, при истощении запасов ископаемого топлива, покупка новых масел и утилизация отработанных масел становятся всё более обременительными и дорогостоящими. Системы GLW способны продлить срок службы смазочных и гидравлических масел за счёт удаления из масла твёрдых, жидких и газообразных загрязняющих веществ. Поддерживая чистоту масла во время эксплуатации системы GLW также позволяют уменьшить износ двигателя внутреннего сгорания (далее ДВС) и другого оборудования, что значительно снижает затраты на техническое обслуживание и ремонты.

Материалы и методы

GLW предлагает два вида систем очистки масел. Байпасные системы FS для очистки моторного и гидравлического масла и мобильные системы GHN для очистки гидравлического, циркуляционного, трансформаторного, турбинного и других промышленных масел.

Очистка загрязнённого масла происходит в два этапа (рис. 1). Этап 1: Загрязнённое масло под давлением 2-5 Бар поступает в нижнюю часть фильтра, далее в сменном фильтрующем элементе, изготовленного из длиноволокнистого небеленого хлопка со специальной мембраной происходит удаление механических загрязнений размером более 1 микрона. Этап 2: масло проходит через нагретую специальным подогревателем испарительную камеру, где жидкие и газообразные загрязняющие вещества испаряются и немедленно удаляются через паровой клапан. Удаляя воду, диоксид и триоксид

APPLICATION OF GLW SYSTEMS FOR CLEANING INDUSTRIAL OILS

Antoshkin I.F., Alekseev A.P., Musyakaev R.Z.

OIL SYSTEMS LLC offers turnkey solutions in the field of filtration systems for all types of industrial oils. Applications: fleet ships, mining, metallurgy, paper industry, road transport, rail transport, construction equipment, energy, oil industry.

Keywords: oil cleaning, oil filtration, oil filter, wear reduction.

серы, система GLW может значительно уменьшить образование кислот в масле.

Байпасные системы FS [1]

Ассортимент систем очистки масел FS (рис. 2)

Подходит как для ДВС, так и для гидравлических систем. Выбор модели определяется объёмом масляного картера ДВС или объёмом системы гидравлики. Система является байпасной. Она никак не влияет на работу двигателя, не влечет никаких последствий в случае поломки, выхода из строя отдельных узлов. Для подачи масла в систему очистки используется давление масляной системы ДВС.

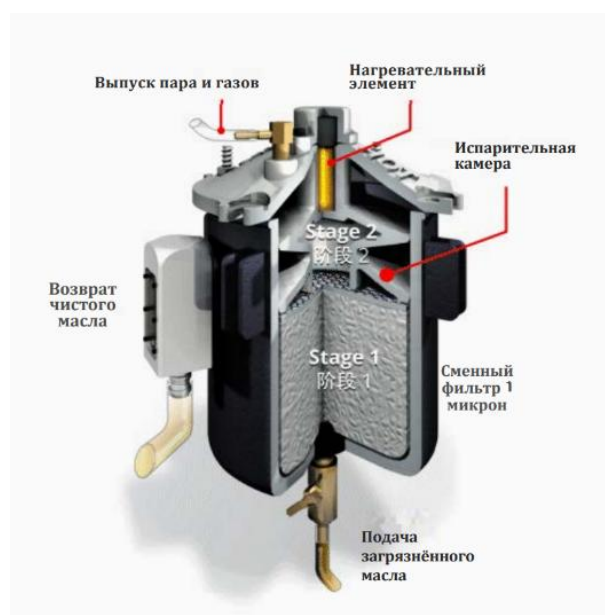


Рис. 1. Принцип работы системы фильтрации GLW



Рис. 2. Системы фильтрации FS

Через дозирующий жиклёр 0,8 мм, который распыляет струю масла и ограничивает скорость потока до 40 литров в час, что предотвращает падение давления в масляном контуре и как следствие не допускает масляного голодания ДВС, масло попадает в сменный фильтрующий элемент, где удаляются загрязнения более 1 микрона. Далее, масло проходит через сменный фильтрующий элемент, очищая масло от загрязнений выше 1 микрона. Затем масло проходит через нагретую испарительную камеру, где жидкие и газообразные загрязняющие вещества испаряются и немедленно выводятся через паровой клапан. Удаляются загрязняющие вещества, такие как вода и диоксид серы из масла, предотвращая таким образом, образование кислот в масле.

После очистки чистое масло возвращается в резервуар двигателя (отстойник) под действием силы тяжести (самотеком).

Байпасный фильтр выполняет две основные функции: обеспечивает очень высокую эффективность фильтрации и обеспечивает высокую способность удерживать загрязнения. Цель конструкции состоит в том, чтобы поместить большую часть удаляемых загрязняющих веществ в обходной фильтр, оставив при этом полнопоточный фильтр относительно чистым. «Чистый» полный поток выгоден для обеспечения легкого прохода масла при нормальной работе двигателя и особенно при холодном пуске. При этом из масляного потока удаляются вредные абразивные частицы, в процессе работы не образуется вредный осадок, который вступает в химическую реакцию с компонентами масла и способствует ускорению его деградации (истощаются добавки (присадки)).

Ключевой функцией байпасных фильтров является удаление органических материалов (шлама, нагара, смолы, сажи, несгоревшего топлива и т. д.)

Последствия загрязнения твердыми частицами - износ! Зазор между большинством движущихся частей в двигателе менее 5 микрон. Частицы от 5 до 20 микрон вызывают износ двигателя.

Еще в 1997 году производителем двигателей Cummins было проведено исследование [2], которое показало, что при использовании байпасной системы фильтрации масла, значительно снижается износ двигателя.

Исследование было выполнено с использованием методики SAE 710813 и 790089, чтобы измерить фактическую разницу между стандартным полнопоточным фильтром на 30 микрон и сверхтонкой глубиной фильтрации 5 микрон или ниже. Исследования проводились как в лабораторных условиях на стенде, так и в полевых.

Результаты тестов:

- Износ верхнего подшипника шатуна уменьшен на 30%. (рис. 3)
- Износ нижнего подшипника шатуна уменьшен на 63%. (рис. 3)
- Износ верхнего коренного подшипника уменьшен на 49%. (рис. 3)
- Износ нижнего коренного подшипника уменьшен на 64%. (рис. 3)
- Износ верхнего компрессионного кольца уменьшен на 63%. (рис. 4)
- Износ второго кольца уменьшен на 27%. (рис. 4)
- Износ маслосъемного кольца уменьшен на 7%. (рис. 4)
- Износ подшипника коленвала уменьшен на 88% (рис. 5)

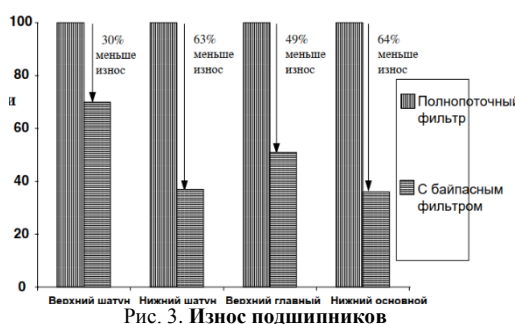


Рис. 3. Износ подшипников

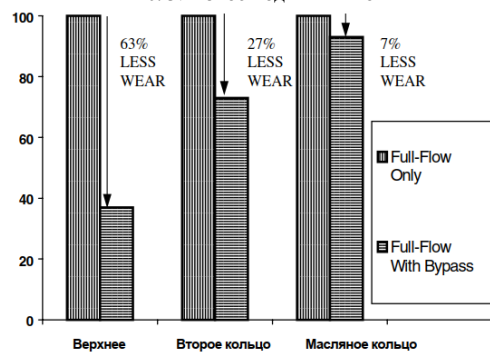


Рис. 4. Износ колец

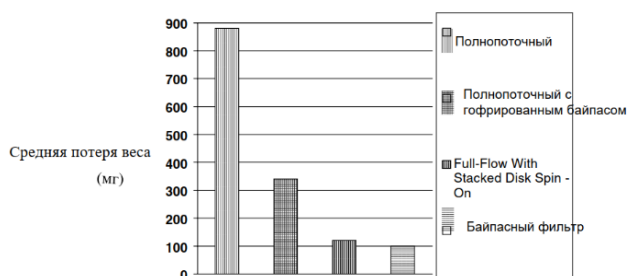


Рис. 5. Износ подшипника коленвала

Сегодня Cummins имеет дочернее предприятие, занимающееся производством байпасных систем, но широкого распространения они не получили и не предлагаются даже в качестве опции, т.к. производителю не выгодно столь существенное увеличение ресурса основных узлов двигателя.

Компания ООО «МАСЛЯНЫЕ СИСТЕМЫ» провела в условиях реальных крупных Российских предприятий ряд Опытно-промышленных испытаний (ОПИ) систем очистки моторных масел FS, которые показали возможность увеличить срок использования моторного масла в 6-8 раз:

- Михайловский ГОК, испытания проводились на БелАЗе 75131 и БелАЗе 75307. Масло Лукойл Авангард М3. При регламенте замены масла через 250 моточасов, с использованием систем FS масло отработало более 1500 моточасов и оставалось в пригодном для дальнейшего использования состоянии [3].

- Выксунский Металлургический Завод, испытания проводились на фронтальном погрузчике LIEBHERR, перегружателе лома LIEBHERR и боковом погрузчике BAUMANN. Применяемые масла Лукойл Авангард профессионал, ТАИФ TIRATA, OIL SYSTEMS MOTOR SYNT PAO CJ4. При регламенте 250 моточасов все масла отработали более 1500 моточасов и оставались годными для дальнейшего использования [4].

- Судходная компания ИНОК ТМ, испытания проходили на сухогрузе ПОЛА ФЕОДОСИЯ на главном судовом двигателе, в данный момент испытанья продолжаются, с результатами можно будет ознакомиться по ссылке [5].

- Компания ЮжУралЗолото, испытания проводились на БелАЗе 75131, масло Shell Rimula R4, при регламенте 250 моточасов, масло наработало более 1500 моточасов [6].

Мобильные системы ГНН [7]

Модельный ряд мобильных систем фильтрации масла ГНН (рис. 6) предназначен для очистки различных типов масел: гидравлического, компрессорного, циркуляционного, трансформаторного, турбинного и других. Системы фильтрации ГНН

предусмотрены для работы с большим объемом масел. ГНН способны очищать до 18 000 литров гидравлического, до 150 000 литров турбинного масел при скорости до 240 литров в час. ГНН изготовлена из нержавеющей стали, что обеспечивает долговечность и защиту от коррозии.



Рис. 6. ГНН280PH

Производятся мобильные системы очистки масел, работающие без давления и под давлением, с предварительным подогревом и без подогрева, позволяющие использовать систему в любых ситуациях, комбинировать, компоновать, решать нестандартные задачи по очистке масел на объектах любой сложности.

Система может быть модернизирована, дополнена, скомпонована под любую задачу по очистке масла.

Результаты ОПИ систем очистки масел ГНН:

- Марийский ЦБК, циркуляционная система масла сушильной камеры. Масло Rosneft Flowtek PM220. В июле 2020 года масло планировалось под замену из-за большого количества воды и механических загрязнений, после установки системы очистки ГНН280PH в течение месяца были удалены все загрязнения [8] и масло на сентябрь 2022 года до сих пор работает.

- ЧТПЗ, турбинное масло ТП-22, объём 20 м³, было большое количество загрязнений, в январе 2021 года масло планировалось под замену, после установки системы очистки ГНН380PH в течение месяца масло было полностью очищено и по состоянию на сентябрь 2022 года работает до сих пор.

- Среднеуральская ГРЭС, ОПИ проводились на четырёх турбинах с маслом ТП-22 и объёмом 30 м³

и 50 м³. При применении системы очистки GHH680PH на всех турбинах была удалена вода и механические загрязнения. Даже новое масло на 11 турбине с классом чистоты 10 по ГОСТ было очищено до класса чистоты 6 по ГОСТ. Практически в 20 раз было уменьшено количество механических частиц по сравнению с требованием к качеству нового масла, что конечно существенно повлияет на уменьшение износа дорогостоящего оборудования и уменьшение его ремонта [9].

Результаты и обсуждение

С результатами проведения опытно-промышленных испытаний систем GLW на технике и оборудовании крупных промышленных, транспортных и энергетических предприятий можно ознакомиться, пройдя по ссылке [10]

Заключение

Преимущества применения систем фильтрации масла GLW

Постоянно поддерживая чистоту масла во время работы, мы можем эффективно достичь следующего.

Значительно снизить операционные расходы за счет:

- Значительно увеличенных интервалов замены масла
- Значительного сокращения новых закупок нефти
- Повышения эффективности двигателя, тем самым снижения расхода топлива
- Сокращения времени простоя, тем самым увеличивая чистую прибыль

Значительно снизить капитальные затраты на

- Увеличение срока службы двигателя и оборудования
- Предлагаем быструю окупаемость

Вносить значительный вклад в сохранение окружающей среды за счет:

- Снижения загрязнения окружающей среды за счет сокращения складирования и утилизации отходов.
- Сведения к минимуму вероятности случайного проливания масла

Значительно снизить затраты на техническое обслуживание за счет:

- Удаление шлама, изнашивающего детали двигателя и оборудования;
- Предотвращения образования кислот, вызывающих коррозию деталей двигателя и оборудования;

- Удаления разжижения топлива;
- Предотвращения образования водомасляной эмульсии;
- Снижения затрат на переработку и утилизацию отработанного масла;

Нашей компанией дополнительно разработана удаленная система мониторинга контроля работы основных узлов системы, а именно контроль уровня масла в системе, что позволяет судить о состоянии фильтрующего элемента, температуры испарительной камеры, наработки в моточасах. Это позволяет исключить человеческий фактор при контроле работы системы и принятия своевременных решений по ее обслуживанию.

[1] Руководство по эксплуатации байпасных систем фильтрации масла FS

<https://drive.google.com/file/d/1gnNgux5j83xwgKsHdPSRfj7IAiDSnu8c/view?usp=sharing>

[2] Доклад «Новый метод комбинированной полнопоточной и байпасной фильтрации: Venturi Combo, № 972957. Подразделение Fleetguard компании Cummins Engine Co. 1997 г.

https://www.cumminsfiltration.com/sites/default/files/pdf_archive/pdf_s/product_lit/americas_brochures/972957.pdf

[3] ОПИ Михайловский ГОК

https://drive.google.com/drive/folders/1ejOBSfyu9_SQPWCi5h1uWkMZ7B5jSmZu?usp=sharing

[4] ОПИ ВМЗ

https://drive.google.com/drive/folders/1iNI5Q76tMysL_WxVJkpWE7GBiU1r1jBX?usp=sharing

[5] ОПИ ИНОК ТМ

https://drive.google.com/drive/folders/1MW2d79wzaUgx7XNW9wIx_pwrZYq3losb?usp=sharing

[6] ОПИ ЮГК

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1mChHZZvfyxkDDCu8wj7bM8fDF3AE6XGm/edit?usp=sharing&ouid=117749883864848273467&rtfpof=true&sd=true>

[7] Руководство по эксплуатации мобильных систем очистки масел GHH

https://drive.google.com/file/d/1NFHLiaETDm9eaHtcBngX08OYNM_RqdmUH/view?usp=sharing

[8] ОПИ МЦБК

https://drive.google.com/drive/folders/1OpXQXr7OH4v_UFFNdwlZ_QCON3NS11t0p?usp=sharing

[9] ОПИ СуГРЭС

<https://drive.google.com/drive/folders/1v-Lz7DkIaJedw9P-BupeNxfIvP9H-zzG?usp=sharing>

[10] Результаты проведения опытно-промышленных испытаний систем GLW на технике и оборудовании крупных промышленных, транспортных и энергетических предприятий.

https://drive.google.com/drive/folders/1HvIMA_CukoAT_1RvgNkgM1tFY8_Ym0Pg?usp=sharing

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИЛЬТРА МАСЛА GLW FS50

Антошкин И.Ф., Алексеев А.П., Мусьякаев Р.З.

E-mail: aa@glwglobal.ru

ООО «МАСЛЯНЫЕ СИСТЕМЫ», Москва, Россия

Компания ООО «МАСЛЯНЫЕ СИСТЕМЫ» предлагает готовые решения в области систем фильтрации любых типов промышленных масел. В данном докладе представлены данные, полученные при проведении научных исследований фильтрующего элемента GF систем GLW FS50 предназначенной для очистки любых типов моторных масел.

Ключевые слова: масляный фильтр, грязеемкость фильтра, производительность фильтра, пропускная способность фильтра, фильтрующий элемент.

Введение

Нефть – дефицитный ресурс. Смазочные масла широко используются во многих двигателях. Со временем масла в двигателях загрязняются. К основным загрязнителям относятся пыль, твердые частицы, сажа и вода. Из-за накопления загрязняющих веществ масло теряет свою эффективность, а это сказывается на работе двигателя. Фильтрация масла является одним из лучших способов удаления загрязнений и продления срока службы масла.

Важной задачей современных масляных фильтров является поддержание масла на первоначальном уровне без потери присадок. Важнейшими параметрами масляных фильтров являются их грязеудерживающая способность, эффективность удаления частиц и пропускная способность. В этом исследовании масляные фильтры компании GLW были протестированы на эти параметры. В промышленности в качестве тестовых частиц обычно используются частицы размером 20 мкм. В этом исследовании для тестирования были использованы частицы от 2 до 20 мкм.

Материалы и методы

В рамках этого проекта компанией GLW совместно с Инновационным центром экологических и водных технологий (Сингапур) был разработан метод определения концентрации частиц в масле. [1] Этот способ был адаптирован и модифицирован по сравнению с известным способом определения концентрации твердых частиц в сточных водах [2]. Используя этот метод, была определена концентрация в масле частиц более

GLW FS50 OIL FILTER PERFORMANCE STUDY

Antoshkin I.F., Alekseev A.P., Musyakaev R.Z.

OIL SYSTEMS LLC offers turnkey solutions in the field of filtration systems for all types of industrial oils. This report presents data obtained during scientific research of the GF filter element of the GLW FS50 systems designed to clean all types of motor oils.

Keywords: oil filter, filter dirt capacity, filter performance, filter throughput, filter element.

1 мкм. Другие протестированные методы, включая микроскопию, абсорбцию, гемацитомер, привели к ряду ограничений, которые не позволили окончательно определить концентрацию частиц в масле. Испытания фильтрующего элемента GF входящего в систему GLW, для очистки моторного масла, FS50 [3] проводились с использованием частиц железа, углерода и графита, которые имели определённый размер. По запросу компании GLW в лабораториях Инновационного центра экологических и водных технологий были проведены тестовые испытания байпасной системы очистки моторного масла FS 50. Целью испытаний было:

1. охарактеризовать размер и форму частиц в масле на основе микроскопии и просеивании частиц разных размеров через фильтр.
2. Оценить эффективность удаления частиц через фильтрующий элемент GLW при очистке отработанного масла.
3. Оценить пропускную способность фильтра за определённые интервалы времени
4. Оценить грязеемкость фильтров путем увеличения количества частиц синтетических загрязнений путем добавления в масло частиц загрязнения определённого известного размера.

Для проведения данных испытаний компанией GLW была предоставлена экспериментальная установка (рис. 1). Принципиальная схема установки показана на (рис. 2). Сменные фильтрующие фильтры были предоставлены компанией GLW (рис. 3-4). Во всех экспериментах использовалось моторное масло Pennzoil SAE 10W40 [4]. Для имитации грязи в масле были использованы четыре типа частиц микронного

размера. Характеристики частиц приведены в (табл. 1) Был разработан наиболее точный метод определения концентрации частиц в масле с использованием общего количества твердых частиц и количества взвешенных частиц. В этом методе масляную смесь, содержащую частицы, фильтруют через фильтр из хлопкового волокна (GF) с размером пор 1 мкм, которые в несколько раз меньше размера частиц, используемых в эксперименте. Далее фиксировали массу масла, которое было отфильтровано через GF. После фильтрации волокнистый фильтр с захваченными частицами и маслом промывали большим количеством гексана, чтобы удалить всё масло. После удаления масла фильтр подвергали сушке в духовке при температуре 105 градусов в течение 2 ч. Это гарантировало удаление гексана, оставляя на фильтре только частицы загрязнения. После этого был произведён замер массы фильтрующего элемента и из неё вычтена масса сухого фильтра GF, замер которой был произведён до начала эксперимента. Таким образом было определено количество частиц загрязнений, оставшихся в фильтре после фильтрации масла. Масса фильтра определялась с помощью высокочувствительных микровесов.

При проведении экспериментов каждый раз использовался новый сменный фильтр. Во всех испытаниях использовалась фиксированная начальная концентрация 0,5% для каждой из четырёх частиц загрязнения. Концентрация частиц при проведении фильтрации определялась через 10, 20, 30, 60, 90 и 120 минут. Результаты эффективности удаления частиц указаны на (рис. 5) и (табл. 2) После работы системы фильтрации эффективность удаления всех частиц после 2 часов достигла более 99,5%. Сравнение цвета отфильтрованного масла на примере частиц железа 6-9 мкм через различные промежутки времени показаны на (рис. 6). Сравнение цвета нового и отфильтрованного масла показаны на (рис. 7).

Грязеемкость фильтра определялась с использованием частиц железа размером 10 мкм. Эксперимент был проведён на новом фильтре. При концентрации загрязнений в масле 0,5% было получено 7,5 г частиц. Частицы добавлялись в чистое масло и фильтрацию продолжали пока не было удалено 95% частиц. После этого в масло добавляли ещё 7,5 г загрязняющих частиц и масло фильтровали пока не достигли эффективность 95%. Этот процесс удаления и фильтрации продолжался до тех пор, пока фильтр не был полностью загрязнён и больше не мог производить фильтрацию масла.



Рис. 1 Установка для испытаний системы фильтрации GLW

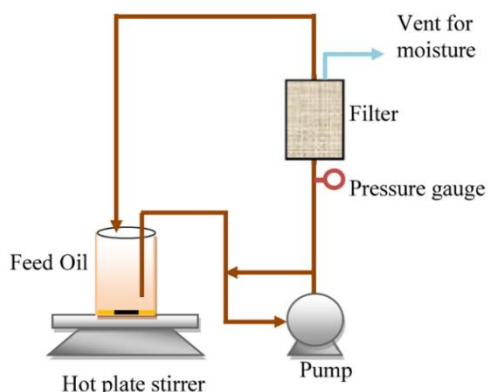


Рис. 2. Принципиальная схема установки для испытаний



Рис. 3. Система фильтрации FS50



Рис. 4. Сменный фильтрующий элемент GF50

После этого подсчитывали количество частиц, добавленных в масло, и вычитали количество частиц, оставшихся в масле. В результате эксперимента было установлено, что грязеудерживающая способность фильтра для частиц железа 10 мкм составляет 316,5 г. Затем была проведена ещё одна серия экспериментов для определения зависимости пропускной способности фильтра в зависимости от загрузки фильтра частицами загрязнений. В этом эксперименте к образцу масла каждый раз добавляли 50 г (соответствует 3,33%) частиц и фильтровали до тех пор, пока не было удалено более 95% частиц. Поток масла через фильтр в конце определялся на основе объёмного расхода, который называется пропускной способностью фильтра. После этого добавляли ещё 50 г частиц и эксперимент повторяли. Это продолжали до тех пор, пока пропускная способность фильтра не упала очень близко к 0. Зависимость между пропускной способностью фильтра и загрузкой частиц показана на (рис. 8). Из графика видно, что нулевая пропускная способность фильтра наступила при добавлении в масло 348 г частиц, что близко к результатам, описанным выше.

Табл. 1 Характеристики частиц, использованных в экспериментах

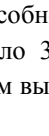

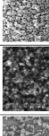
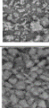
Sl. No	Material	origin	Average Particle size (µm)	Density (gm/cc)	SEM image
1	Iron	Merck	10	7.86	
2	Iron	Sigma	6-9	7.86	
3	Carbon	Sigma	2-12	0.25-0.6	
4	Graphite	Sigma	<20	0.056-31.887	

Табл. 2. Эффективность удаления различных частиц

Running Time	10 um (Iron)		2-12 um (Carbon)		<20 um (Graphite)		6-9 um (Iron)	
	ppm	% Efficiency	Ppm	% Efficiency	ppm	% Efficiency	ppm	% Efficiency
10	452	91.58	350	93.92	350	93.92	442	92.14
20	230	95.71	190	96.70	190	96.70	290	94.84
30	184	96.56	110	98.09	110	98.09	169	96.99
60	88	98.36	55	99.04	55	99.04	65	98.84
90	43	99.20	25	99.57	25	99.57	18	99.68
120	19	99.65	15	99.74	15	99.74	12	99.79

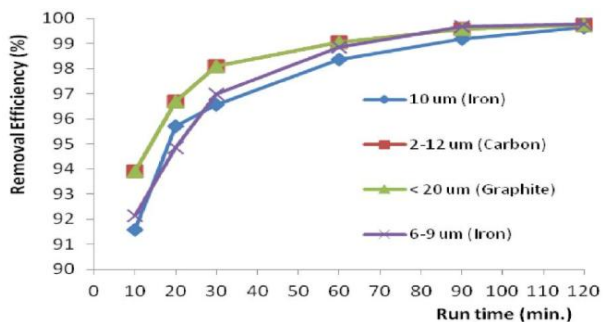


Рис. 5. Эффективность удаления различных частиц

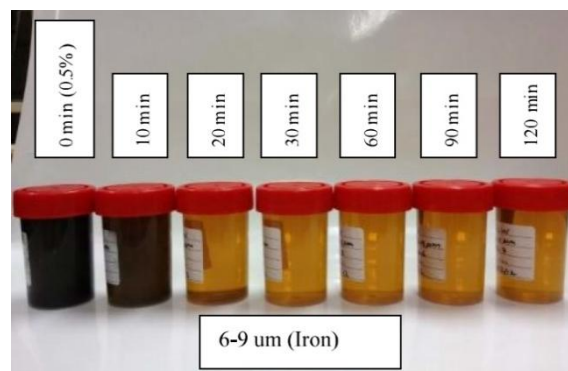


Рис. 6. Сравнение цвета отфильтрованного масла через различные промежутки времени

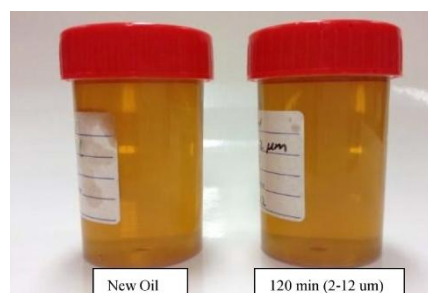


Рис. 7. Сравнение цвета масла нового и отфильтрованного в течение 2 часов

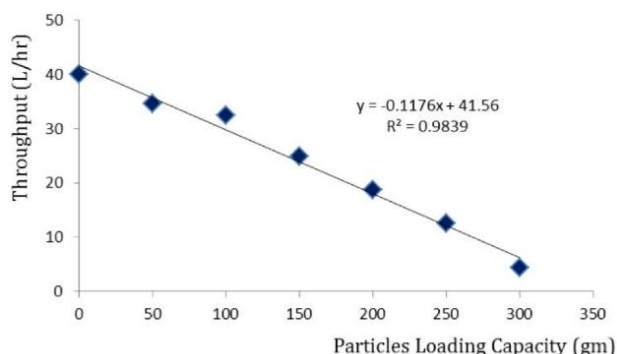


Рис. 8. Зависимость между пропускной способностью фильтра и загрузкой частиц

Система GLW предназначена также для отвода любой влаги, которая может присутствовать в масле. Поскольку температура в масле поддерживается на уровне, близком к точке кипения воды, вода удаляется из масла. В большинстве экспериментов из испарительного отверстия можно было увидеть конденсат влаги, указывающий на присутствие некоторого количества воды в масле или попадании влаги в масло из окружающей среды (рис. 9).

Результаты и обсуждение

В этом исследовании был разработан высокоточный метод определения концентрации частиц загрязнений в масле. Ограничением этого метода является только то, что он способен обнаруживать только частицы размером более 1 мкм.

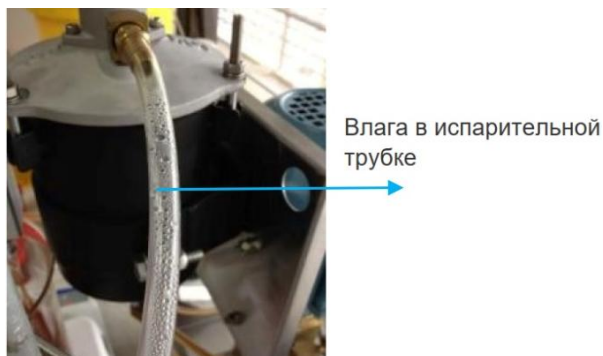


Рис. 9. Наличие конденсата при испарении воды

Заключение

Было установлено, что фильтр очистки моторного масла FS50 обладает хорошей эффективностью удаления частиц загрязнения в масле размером от 2 до 20 мкм. Так же установлено, что данный фильтр имеет ёмкость для загрузки грязи 316 г для частиц размером 10 мкм.

[1] Исследование производительности фильтра GF50 в системе фильтрации GLW FS50 EVS0063, PRVS0084 (IVS1873) 2012 г.

<https://drive.google.com/file/d/13roBNvCLvmqfLFEdRbOqRaLYXleRvLN/view?usp=sharing>

[2] АРНА, АWWA, WEF, (2005), Стандартные методы исследования воды и сточных вод, 21-е издание.

<https://drive.google.com/file/d/1gE7KXpUpMzalkMgvtD9JuPwz0IqbJ2dt/view?usp=sharing>

[3] Руководство по эксплуатации байпасных систем фильтрации масла FS

<https://drive.google.com/drive/folders/1g3rEUFhkkH9okV8yhDG8FmL-wQT8in?usp=sharing>

[4] Паспорт безопасности материала. Pennzoil SAE 10W30

https://drive.google.com/file/d/1yEhmgRAAkdWJXKnSwGm_8Ev3IMyyFv9/view?usp=sharing

АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ

Афанасьева Л.Е. *, Измайлов В.В., Новоселова М.В., Барчуков Д.А.

*E-mail: ludmila.a@mail.ru

Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия.

Статья посвящена исследованию износостойкости нержавеющей стали, изготовленной по технологии селективного лазерного плавления. Результаты могут быть востребованы при разработке технологий послойного синтеза деталей.

Ключевые слова: износостойкость, шероховатость, селективное лазерное плавление, нержавеющая сталь.

Введение

Селективное лазерное плавление (СЛП) – интенсивно развивающаяся технология изготовления деталей послойным синтезом на основе моделей автоматизированного проектирования. Технология основана на послойной перекристаллизации порошкового материала из жидкой фазы со скоростью охлаждения $\sim 10^5$ °C/с

ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF STAINLESS STEEL PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING

Afanasieva L.E., Izmailov V.V., Novoselova M.V., Barchukov D.A.

The article is devoted to the study of the wear resistance of stainless steel manufactured using the technology of selective laser melting. The results can be used in the development of technologies for the layer-by-layer synthesis of parts.

Keywords: wear resistance, roughness, selective laser melting, stainless steel.

помощью лазерного излучения. В результате во всем объеме получаемого материала формируются метастабильные структуры. СЛП позволяет получать такие же или улучшенные механические свойства материала по сравнению с отливками или штамповками [1].

Многие исследователи наблюдают анизотропию свойств и отмечают, что стратегия

сканирования лазерным лучом и направление синтеза оказывают большое влияние на свойства изготавливаемых деталей [1-5].

В работе [2] изучали зависимость плотности и микротвердости образцов нержавеющей стали от режимов послойного синтеза лазерным лучом. Для всех исследованных образцов не зависимо от плотности, микротвердость стали в плоскости слоя до 20 % выше, чем в поперечном сечении.

Комплексный анализ микроструктуры и коррозионной стойкости нержавеющей стали 316L, изготовленной по технологии СЛП проведен в работе [3]. Показано, что в плоскости слоя сталь обладает более высокой коррозионной стойкостью, чем в поперечном сечении.

Цель работы – проведение испытаний на изнашивание образцов нержавеющей стали, изготовленных по технологии послойного синтеза с помощью лазерного излучения.

Материалы и методы

Для изготовления опытных образцов использовали порошковый материал марки CL20ES. Химический состав порошка (табл. 1) соответствует элементному составу сталей марок AISI 316L и 03X17H14M3 (ГОСТ 5632-2014). Средний размер частиц порошка ~30 мкм.

Табл. 1. Концентрация элементов в порошке, % масс.

Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
0,7±0,1	1,7±0,1	18,5±0,2	12,2±0,3	2,3±0,9	основа

Послойный синтез образцов проводили на комплексе M2-cusing фирмы Concept Laser. Установка оснащена Yb:YAG-оптоволоконным лазером с диодной накачкой. Режимы синтеза даны в табл. 2. Размер образцов 30×30×6 мм.

Табл. 2. Параметры СЛП

Мощность излучения, Вт	Скорость сканирования луча, м/с	Диаметр пятна, мкм
200	0,8	50

Испытание на изнашивание образцов проводили о закрепленный абразив по схеме шар – плоскость. В качестве контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна – 40...50 мкм. К контакту прикладывали нормальное усилие 0,5 Н. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой

$\nu = 20$ Гц. Каждый образец подвергался испытанию в течение времени $t = 70$ мин. Путь трения составлял $L_{тр} = 1\ 008$ м. Испытания на изнашивание проводили в плоскости слоя и под углом 45° к направлению синтеза (рис. 1).

С поверхности образцов перпендикулярно канавкам изнашивания снимали профилограммы (рис. 2а и 2б), по которым определяли ширину D и максимальную глубину h канавки изнашивания.

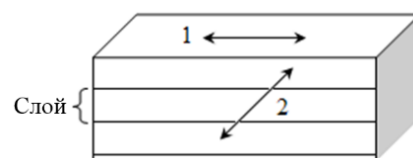


Рис. 1. Схема перемещения контробразца: направление 1 – в плоскости слоя; 2 – под углом 45° к направлению синтеза

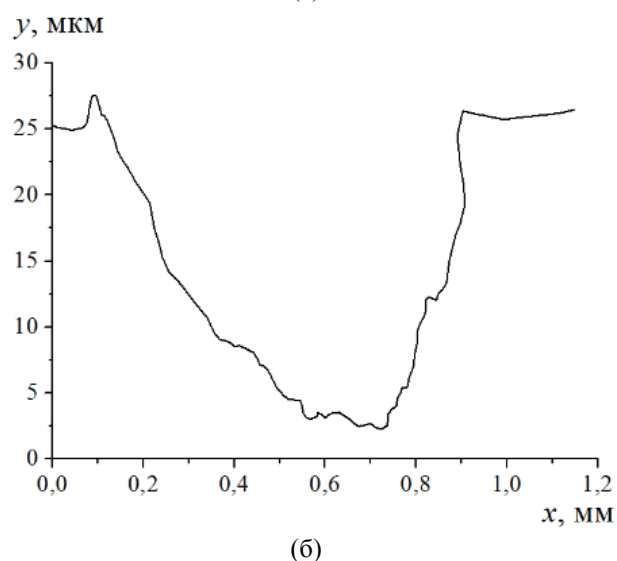
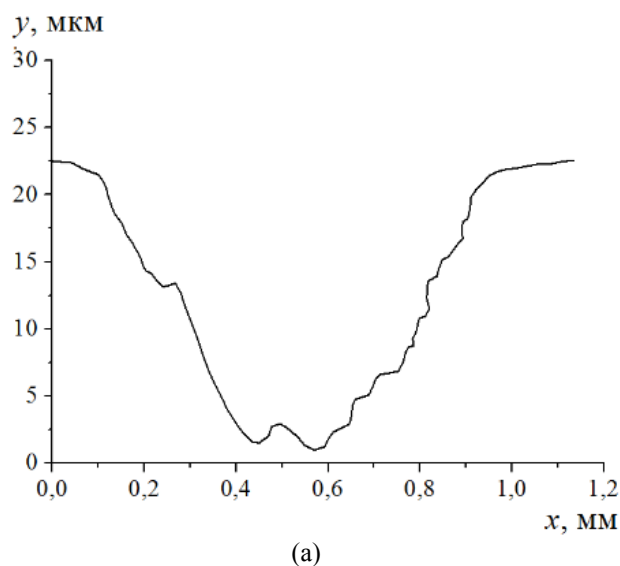


Рис. 2. Типичные поперечные профилограммы поверхности канавки изнашивания: в плоскости слоя (а); под углом 45° к направлению синтеза (б)

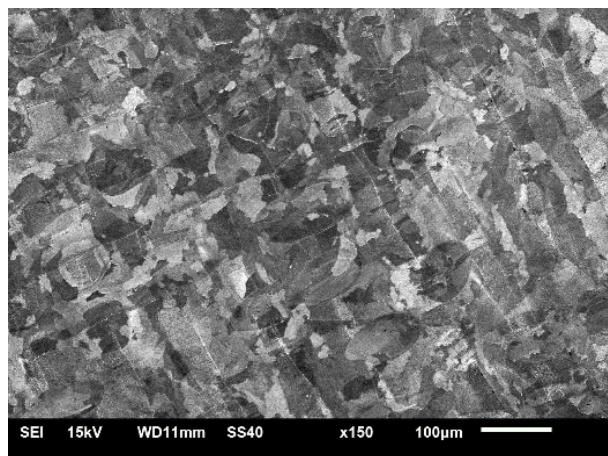
Рассчитывали характеристики изнашивания образца: линейный износ за цикл $I = h/(v \cdot t)$; скорость изнашивания $u = V/t$; линейную интенсивность изнашивания $I_h = h/L_{тр}$; объемную интенсивность изнашивания $I_v = V/L_{тр}$, где V – объемный износ (объем канавки износа); коэффициент изнашивания $k = I_v \cdot H/N$, где H – микротвердость.

Исследование структуры проводили в плоскости слоя (продольное сечение) и в направлении синтеза образцов (поперечное сечение) с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) модели JEOL JSM-6610LV.

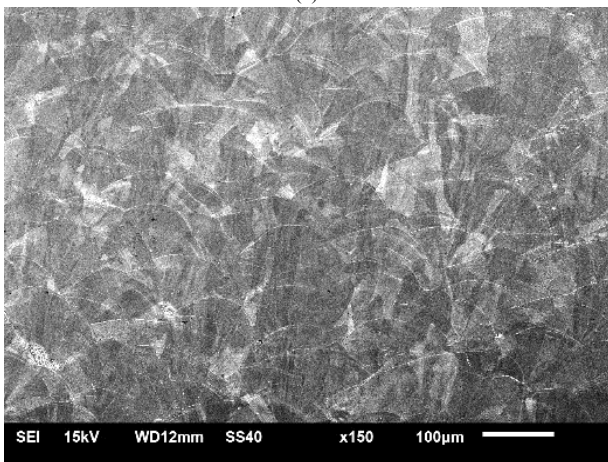
Для измерения микротвердости применяли метод восстановленного отпечатка на приборе ПМТ-3. Усилие на индентор 0,98 Н.

Результаты и обсуждение

Сталь марки 03X17H14M3 по микроструктуре относится к аустенитному классу. На рис. 3а представлено изображение микроструктуры стали в плоскости слоя. Прослеживаются дорожки плавления при сканировании лазерного луча.



(а)

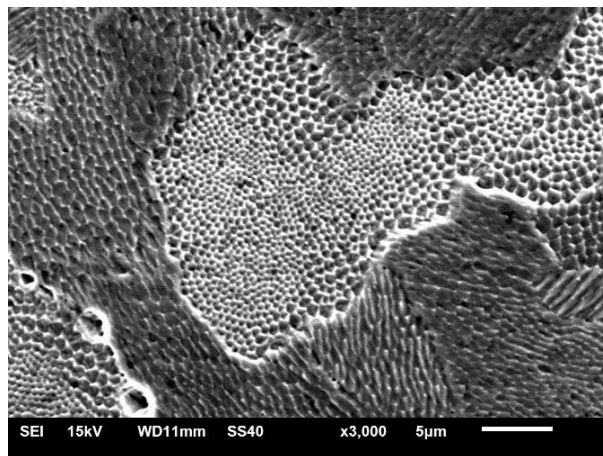


(б)

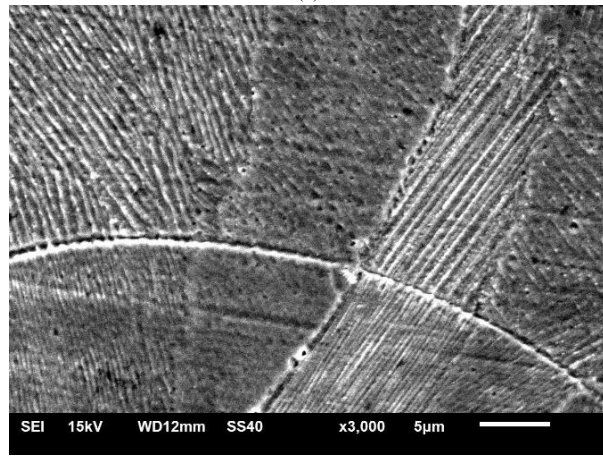
Рис. 3. РЭМ – изображения микроструктуры стали 03X17H14M3: в плоскости слоя (а); в направлении синтеза (б)

На рис. 3б дано изображение микроструктуры в направлении синтеза образца. Когда непрерывный лазерный луч движется по поверхности порошка, образуется валик расплавленного металла. При последовательном многослойном синтезе в поперечном сечении формируется характерная дугообразная структура зон плавления.

При большем увеличении микроскопа выявляется цилиндрическая трехмерная субструктура стали (рис. 4). Во время процесса послойного синтеза в зоне лазерного воздействия возникает большой температурный градиент, способствующий формированию анизотропных микроструктур. В плоскости слоя в основном преобладает ячеистая субструктура, т.е. цилиндрические субзерна выстраиваются основанием вверх внутри зерна (рис. 4а). Отдельные зерна имеют столбчатую субструктуру, но их доля небольшая. В поперечном сечении преобладает столбчатая субструктура, в поле зрения находятся боковые части цилиндров. Встречаются отдельные зерна с ячеистой субструктурой, но их доля заметно меньше, чем в продольном сечении образца (рис. 4б).



(а)



(б)

Рис. 4. РЭМ – изображения субструктуры нержавеющей стали: ячеистой в плоскости слоя (а); столбчатой в поперечном сечении образца (б)

Формирование анизотропных микроструктур приводит к анизотропии свойств. Микротвердость нержавеющей стали в продольном сечении равна 3280 ± 50 МПа, в поперечном сечении значительно ниже – 2600 ± 60 МПа. Характеристики изнашивания образца приведены в табл. 3.

Анализ результатов экспериментальных исследований выявил заметное различие характеристик изнашивания в плоскости слоя и под углом 45° к направлению синтеза. Износостойкость нержавеющей стали в плоскости слоя выше, чем, в поперечном сечении.

Пор, несплавлений, трещин на поверхности шлифов не выявлено.

Табл. 3. Характеристики изнашивания образца в различных направлениях записи профилограммы

Параметр	В плоскости слоя	Под углом 45° к направлению синтеза
h , мм	0,022	0,028
I_h , 10^{-8}	2,18	2,80
I_v , 10^{-14} м ²	1,96	2,78
i_h , 10^{-7} мм/цикл	2,62	3,33
u , 10^{-2} мм ³ /ч	1,69	2,40
k , 10^{-4}	1,28	1,45

Заключение

Проведенные исследования показали, что образцы нержавеющей стали, изготовленные по технологии СЛП, обладают анизотропией свойств: в плоскости слоя микротвердость и износостойкость выше на 20% и на 40% соответственно по сравнению с поверхностным слоем в направлении синтеза. Этот факт необходимо учитывать при изготовлении изделий.

[1] Смуров И.Ю. Оборудование и технология селективного лазерного плавления / И.Ю. Смуров, Т.В. Тарасова, А.П. Назаров, Д.В. Котобан. – М.: МГТУ "СТАНКИН", 2015. – 142 с.

[2] Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В., Иванова А.И., Новоселова М.В., Зоренко Д.А. Микроморфология поверхности и структура нержавеющей стали, полученной селективным лазерным плавлением // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 11. – С. 41-47.

[3] Zhao C., Bai Y., Zhang Y., Wang X., Xue J.M., Wang H. Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behavior of selective laser melted 316L stainless steel // Materials & Design. – 2021. – V. 209. – P. 109999.

[4] Guan K., Wang Z., Gao M., Li X., Zeng X. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel // Materials & Design. – 2013. – V. 50. – P. 581-586.

[5] Базалева К.О., Цветкова Е.В., Балакирев Э.В. Процессы рекристаллизации аустенитного сплава, полученного методом селективного лазерного плавления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2016. – № 5. – С. 117–127.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ МОТОРНОГО МАСЛА В КАЧЕСТВЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

¹Бакулина В.Д. *, ^{1,2}Корнеев С.В.

*E-mail: ver-bakulina81@mail.ru

¹ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия;

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», Омск, Россия.

Представлены результаты исследования моторных масел разных производителей, разбавленных различными концентрациями дизельного топлива. Цель исследования – установление взаимосвязи между изменениями температуры вспышки моторного масла и неисправностями топливной системы двигателя внутреннего сгорания автомобилей. Результатом проведенного исследования стало получение зависимостей, характеризующих соотношение концентрации дизельного топлива в моторном масле и температуры вспышки. Попадание топлива в моторное масло свидетельствует о тех или иных неисправностях топливной системы. Таким образом, показатель температуры вспышки моторного масла может быть использован в качестве диагностического параметра двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, топливная система, моторное масло, температура вспышки, диагностика неисправностей, техническое обслуживание двигателей внутреннего сгорания.

Введение

Влияние отдельных показателей работоспособности моторных масел на износ деталей двигателей подробно изучен в работах проф. Корнеева С.В. [1-2]. Обеспечение бесперебойной и долгосрочной работы двигателей внутреннего сгорания является актуальной задачей, предусматривающей соблюдение высоких технико-экономических и экологических требований. Своевременная диагностика неисправностей двигателей внутреннего сгорания – один из путей реализации этих требований. В топливных системах дизельных двигателей подача топлива осуществляется под высоким давлением, и при неисправностях форсунок или недостаточной компрессии возникает опасность попадания топлива в моторное масло [3-5]. Разбавление моторного масла топливом вызывает изменение его физико-химических свойств и, как следствие, – ухудшение работы смазочной системы, что в дальнейшем

USE OF ENGINE OIL FLASH POINT AS A DIAGNOSTIC INDICATOR OF VEHICLE COMBUSTION ENGINES

Bakulina V.D., Korneev S.V.

The results of research of the motor oils from different manufacturers diluted with different concentrations of diesel fuel are presented. The purpose of research is establishing the relationship between changes in the flashpoint of engine oil and malfunctions of the fuel system of the internal combustion engine of cars. The result of the research was obtaining dependencies characterizing the ratio of the concentration of diesel fuel in engine oil and flash point. The ingress of fuel into the engine oil indicates a malfunction of the fuel system. Thus, the indicator of the flash point of engine oil can be used as a diagnostic parameter of internal combustion engines of cars. Thus, the indicator of the flash point of engine oil can be used as a diagnostic parameter of internal combustion engines of cars.

Keywords: internal combustion engines, fuel system, engine oil, flash point, fault diagnosis, maintenance of internal combustion engines.

может привести к выходу из строя двигателя [6-7]. Таким образом, можно говорить о том, что оценка состояния моторного масла может быть использована в качестве способа диагностики неисправностей топливной системы двигателей внутреннего сгорания.

Попадание топлива в моторное масло приводит к изменениям его основных физико-химических характеристик: кислотного и щелочного числа, кинематической вязкости при 100⁰С, температуры вспышки в открытом тигле [8].

Наиболее ярким показателем наличия топлива в моторном масле является температура вспышки, измеряемая в открытом тигле [9-10].

В связи с этим, цель данного исследования заключается в установлении взаимосвязи изменений температуры вспышки моторного масла при разбавлении топливом с предположительными неисправностями топливной системы двигателя.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- проведение высокотемпературного окисления моторных масел (свежих и загрязненных дизельным топливом в различных концентрациях);
- определение температуры вспышки в открытом тигле окисленных моторных масел;
- установление предельной концентрации дизельного топлива в моторном масле;
- разработка рекомендаций по техническому обслуживанию двигателей внутреннего сгорания.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны моторные масла двух разных торговых марок: Лукойл Люкс 5w-40, Ekoil Turbo Max Plus 5w-40. Основные физико-химические показатели исследуемых масел представлены в «табл. 1».

Табл. 1. Характеристики моторных масел, выбранных для проведения исследования.

Показатель	Ekoil Turbo Max Plus 5w40	Лукойл Люкс 5w40
Базовая основа	Синтетическое	Синтетическое
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	13,8	13,6
Щелочное число, мг КОН/г	9,87	8,5
Индекс вязкости	139	176
Температура вспышки в открытом тигле, °С	202	235

Проведение исследования выполнялось методом высокотемпературного окисления. Суть использованного метода заключается в окислении заранее подготовленных образцов свежего моторного масла с добавлением дизельного топлива установленных концентраций. Цель метода – искусственное старение моторного масла в условиях, схожих с работой масла в двигателе внутреннего сгорания, для последующего исследования изменений температуры вспышки.

Окисление моторного масла проводится в присутствии катализаторов – меди и железа.

Оборудование, используемое при проведении исследования: аппарат для определения стабильности масел против окисления АПСМ-1М, окисляющий реагент – кислород, расход окисляющего реагента – 200 мл/мин.

Окисление проводится при следующих условиях: температура – 200 °С, погрешность поддержания стабильности расхода кислорода не более ±10%, абсолютная погрешность поддержания температуры термостатирующей жидкости не более ±0,5 °С, время воздействия на масло – 3 часа [11].

Для испытания были приготовлены по 7 образцов каждого из исследуемых масел:

1. Свежее масло;
2. Окисленное масло;
3. Свежее масло + 0,1% дизельное топливо;
4. Свежее масло + 1% дизельное топливо;
5. Свежее масло + 3% дизельное топливо;
6. Свежее масло + 5% дизельное топливо;
7. Свежее масло + 7% дизельное топливо.

По окончании окисления после остывания масла были проведены измерения температуры вспышки в открытом тигле. Для измерения температуры вспышки в открытом тигле использовался автоматический регистратор температуры вспышки нефтепродуктов «Вспышка-А». Такие же измерения были проведены и у образцов свежего масла, не подвергавшихся окислению.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и рис. 2 представлены зависимости изменений температуры вспышки, полученные в ходе эксперимента, и аппроксимирующие функции.

Уравнение аппроксимации:

$$y = -4,1617x + 218,83 \quad (1)$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = 0,9458$$

Средняя ошибка аппроксимации: 1,07 %.

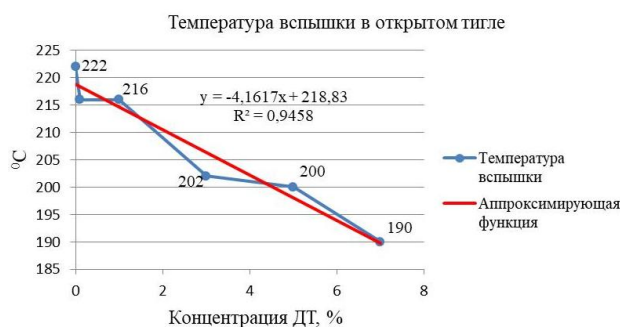


Рис. 1. Температура вспышки в открытом тигле образцов масла EKOIL Turbo Max Plus 5w40

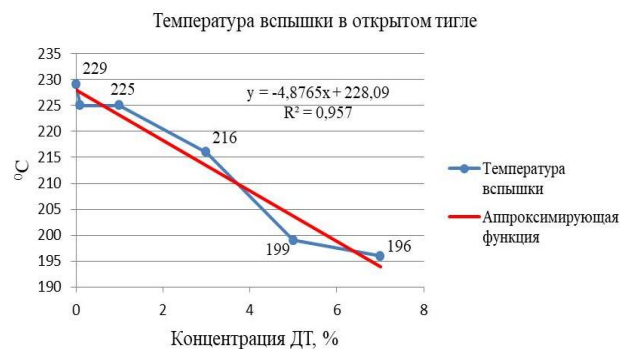


Рис. 2. Температура вспышки в открытом тигле образцов масла Лукойл Люкс 5w40

Уравнение аппроксимации:

$$y = -4,8765x + 228,09 \quad (2)$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = 0,957$$

Средняя ошибка аппроксимации: 1,1 %.

Значения коэффициента детерминации и средней ошибки аппроксимации свидетельствуют о достоверности подобранных моделей.

После решения уравнений аппроксимации для функций, построенных по экспериментальным данным измерения температуры вспышки в открытом тигле образцов масел Ekoil Turbo Max Plus 5w40 и Лукойл Люкс 5w40, получены значения концентрации топлива в моторном масле, при которых происходит отклонение температуры вспышки от значений, представленных для свежих масел (табл. 1). Для масла Ekoil Turbo Max Plus 5w40 этот показатель составляет 4,28%, для масла Лукойл Люкс 5w40 – 1,21%.

Дальнейшее увеличение концентрации топлива в моторном масле, вызванное износом и неисправностями топливной системы, приведет к изменению других его физико-химических характеристик: снижению вязкости и изменению кислотно-щелочных характеристик в сторону увеличения кислотного числа [12]. Все эти изменения могут вызвать снижение работоспособности моторного масла и, в итоге, необходимость его замены для предотвращения негативного влияния на двигатель внутреннего сгорания.

Таким образом, определение изменения температуры вспышки моторного масла в сравнении со значениями, которые регламентированы техническими характеристиками масла, позволит на раннем этапе определить попадание топлива в смазочную систему.

Заключение

Попадание топлива в моторное масло может свидетельствовать о неисправностях топливной системы двигателя внутреннего сгорания.

Разбавление моторного масла топливом даже в небольших концентрациях (от 1,2%) приводит к изменению температуры вспышки моторного масла.

Таким образом, температура вспышки моторного масла может быть использована в качестве диагностического параметра при техническом обслуживании двигателей внутреннего сгорания.

[1] О работоспособности моторных масел / С.В. Корнеев // Двигателестроение. – № 4. – С. 36-38.

[2] Корнеев С.В. Методология совершенствования системы технического обслуживания дорожных, строительных и подъёмно-транспортных машин: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2003. – 297 с.

[3] Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»/ В.П. Алексеев, В.Ф. Воронин, Л.В. Грехов и др.; Под общ. Ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

[4] Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Учебник / В.Г. Дьяченко. – Перевод с украинского языка. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 500 с.

[5] Свистула А.Е. Двигатели внутреннего сгорания: учебное пособие / А.Е. Свистула; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – 81с.

[6] Нигматуллин Р.Г., Костенков Д.М., Хафизова А.Г., Пелецкий С.С. Экспресс-устройство для определения степени разбавления моторных масел топливом и изнашивания двигателя // Химия и технология топлив и масел. – 2012. – № 1. – С. 52-53.

[7] Влияние высоких температур на изменение эксплуатационных характеристик моторных масел при попадании топлива / С.В. Корнеев, В.Д. Бакулина, Я.В. Ярмович, С.В. Пашукевич, В.Б. Пермьяков // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конференции (Россия, Омск, 26-29 февраля 2020 г.). - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. – С.11-12.

[8] Проблема загрязнения деталей двигателей / С.В. Корнеев, В.Д. Бакулина, Р.В. Буравкин, В.И. Гурдин / ВестникСибАДИ, вып.1 (53), 2017. – С. 67-72.

[9] Фитч Дж., Тройер Д. Анализ масел. Основы и применение / Пер. с англ. 2-го изд.; под ред. Е.А. Новикова, М.В. Кирюхина. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2015. – 176с.

[10] Балентас Р., Сафонов А.С., Ушаков А.И., Шергалис В. Моторные масла. – Москва-СПб: Альфа-Лаб, 2000. – 272 с.

[11] Influence of high temperatures on changes in the performance characteristics of motor oils when diluted with fuel / S.V. Korneev, V.D. Bakulina, Y.V. Yarmovich, S.V. Pashukevich, V.B. Permyakov // AIP Conference Proceedings 2285, 020010 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0026994>.

[12] Ермилов Е.А., Ковальский Б.И., Безбородов Ю.Н., Олейник В.З. Оценка процессов окисления и температурной деструкции на противозносные свойства моторных масел / Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 6. – С. 214-222.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩЕГО ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ТРИБОХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИТА В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Балькова Т.И. *, Пикина А.М., Лапсарь О.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С.

*E-mail: balkova@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

В работе предложена технология изготовления гидрофобного пористого графита, путем пропитки фторсодержащим поверхностно – активным веществом. Приведены данные трибологических испытаний масла И-20А, а также смазочных композиций на основе масла И-20А с пропитанным и непропитанным графитом. Показано, что при испытаниях по схеме «колодка – ролик» наблюдается понижение скорости изнашивания, момента силы трения и коэффициента силы трения при использовании композиции с пропитанным графитом.

Ключевые слова: графит, смазочная композиция, трибологические испытания, скорость изнашивания.

Введение

Надежность работы и срок эксплуатации двигателей и механизмов в значительной степени определяется износом контактирующих поверхностей узлов трения. Уменьшение величины коэффициента трения и стабилизация условий работы возможны при введении в узлы трения смазочных сред.

Зачастую нужный эффект не достигается, поскольку смазочные материалы удаляются с поверхности трущихся деталей при их плотном контакте и в результате нагрева. Тогда активное взаимодействие конструктивных узлов может приводить к образованию микросварного соединения (явление схватывания или заедания). К тому же, в процессе эксплуатации ухудшаются физико-химические и эксплуатационные свойства смазок и масел, что вызывает необходимость введение присадок, ингибирующих эти процессы.

В энергонапряженных узлах трения современных и перспективных машин с высокими значениями рабочих параметров (температуры, нагрузки и скорости) применение жидкой смазки затруднено. Радикальным решением проблемы является использование самосмазывающихся

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A FLUORINATED SURFACTANT ON THE TRIBO-CHARACTERISTICS OF GRAPHITE IN FRICTION NODES

Balkova T.I., Pikina A.M., Lapsar O.M., Vetrova S.M., Barchukova A.S.

In this work proposed a technology for manufacturing hydrophobic porous graphite by impregnation with a fluorinated surfactant. The data of tribological tests of I-20A oil, as well as lubricating compositions based on I-20A oil with impregnated and non-impregnated graphite are presented. It is shown that when tested according to the "pad – roller" scheme, a decrease in the wear rate, the moment of friction force and the coefficient of friction force is observed when using a composition with impregnated graphite

Keywords: graphite, lubricant composition, tribological tests, wear rate.

материалов. Наиболее широкое применение получили дисульфид молибдена, нитрид бора и графит. Их используют также в качестве добавки к жидким смазкам и для создания композиций, в которых пористые гигроскопичные самосмазывающиеся материалы пропитывают органическими полимерами для повышения трибозффективности [1-2].

Целью работы являлось создание смазочной композиции масла И-20А с гидрофобным пористым графитом, пропитанным фтор-содержащим поверхностно – активным веществом и определение трибологических свойств полученного состава.

Материал и технология его получения

Графит является гигроскопичным материалом, поглощающим воду и вызывающим коррозию контактирующих с ним металлических поверхностей. Для придания графиту гидрофобных свойств его необходимо пропитывать имеющим высокую проникающую и смачивающую способность составом, в качестве которого было выбрано фторсодержащее поверхностно – активное веществ (фтор - ПАВ).

Состав для пропитывания представляет раствор перфторкислоты марки 6МФК -180 в хладоне 350

(перфторметилциклогексан), имеющем температуру кипения $76,6^{\circ}\text{C}$. Фтор – ПАВ имеет высокую температуру термодеструкции свыше 400°C .

Порошок графита ГС-1 [3], стандартного гранулометрического состава с массовой долей влаги в пределах $0,5\%$ предварительно высушивают в сушильном шкафу при температуре 110°C в течение 5–6 часов. Высушенный порошок загружают в пропиточный автоклав, производят предварительное вакуумирование при остаточном давлении 50 мм. рт. ст. в течение 1 часа, заливают жидкий раствор перфторкислоты в хладоне. Пропитку проводят в течение 24 часов при температуре $65–76^{\circ}\text{C}$ и давлении $0,5–0,6\text{ МПа}$.

Затем сметанообразный порошок пропитанного графита просушивают при комнатной температуре на гладкой поверхности на открытом воздухе в течение 2,5–3 часов. Комки, образовавшиеся после высыхания, прикосновением шпателя превращают в порошок с практически исходным размером частиц. Затем порошок подвергают термообработке при температуре 110°C и атмосферном давлении в сушильном шкафу в течение 2 часов. Вся поверхность каждой частицы графита, включая внутренние поры, оказывается покрытой тонкой пленкой толщиной порядка 3 нм [4].

Подготовка исследуемых материалов к испытаниям состояла в создании смазочных композиций на основе масла индустриального И-20А [3], в которое из расчета 20% об. добавлялся непропитанный графит в одном случае или пропитанный графит в другом.

Методы исследований

Из-за ограниченности распространения метода непрерывного измерения скорости изнашивания [5], нет достоверных экспериментальных данных о трибохарактеристиках большинства материалов. Сами по себе эти характеристики без возможности сравнения с трибохарактеристиками какого-нибудь широко распространенного материала (базы) не дают объективного представления о свойствах и возможностях применения материала. Особенно, если трибохарактеристики были получены на разных машинах (схемах) трения, в разное время, различными методиками и т.д. Поэтому в работе сравнивали показатели, полученные при испытаниях индустриального масла без наполнителя и с графитовым непропитанным и пропитанным наполнителями.

Образцы испытывали на машине трения типа Амслер – «МИ», модернизированной с целью повышения точности и достоверности и уменьшения сроков проведения экспериментов.

Машина снабжена системами создания, поддержания и измерения температур, нормальных сил, линейных скоростей скольжения, моментов сил трения, скоростей изнашивания и т.д. Основные исследуемые параметры – трение и износ фиксируются с помощью двухканального регистратора.

Методика эксперимента согласно [5] состоит в организации вращения ролика, находящегося в емкости тороидальной формы, в которую вливается тщательно взболтанная смазочная композиция (рис. 1).

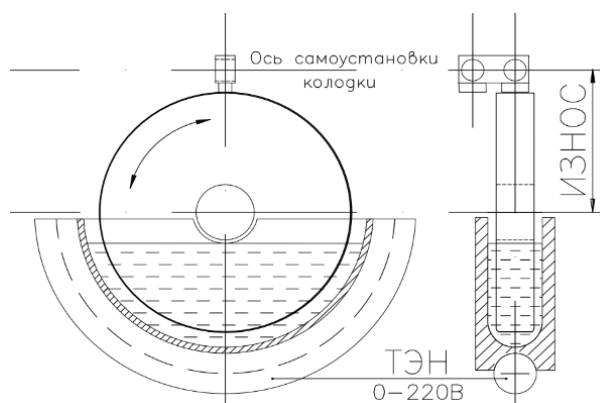


Рис. 1. Испытания по схеме «колодка – ролик»

Прикладывается нормальная сила – контакт рабочих поверхностей самоустанавливающейся колодки и ролика, после чего осуществляется синхронное измерение скорости изнашивания $V_{\text{изн}}$ и момента сил трения $M_{\text{тр}}$ в течение всего опыта без разъединения зоны трения.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования можно разбить на три этапа.

Этап I. Определение нормальной силы, при которой начинает наблюдаться явление схватывания.

Эту серию опытов проводили в базовом материале И-20А, нормальную силу постепенно увеличивали. При достижении давлений, соответствующих нормальной силе, равной $111,23\text{ кгс}$, наступает резко выраженные явления схватывания (заедания), отражающиеся на характерах экспериментальных зависимостей $V_{\text{изн}}$ и $M_{\text{тр}}$, а также в постепенном повышении температуры. Поэтому основные испытания были проведены при нормальной силе, равной $71,19\text{ кгс}$, которая приводила к среднему давлению в зоне трения, равному $395,5\text{ кгс/см}^2$.

Этап II. Испытания трех материалов при выбранной в первом этапе нормальной силе $71,19\text{ кгс}$.

Установлены следующие величины:

1. В базовом масле И-20А средние значения $V_{изн} = 22,5$ мкм/час; $M_{тр} = 33,95$ кгс·см; $f_{тр} = 0,136$; $t = 39,5$ °С.
2. В композиции И-20А + (графит) (20% об.) $V_{изн} = 12,0$ мкм/час; $M_{тр} = 34,46$ кгс·см.
3. В таблице 1 представлены результаты испытаний на машине трения композиции И-20А + (графит + фтор - ПАВ) (20% об). Первое число в интервалах величин $M_{тр}$ и $f_{тр}$ и температуры получено в начале опыта, последнее - в конце опыта.

Табл. 1. Результаты испытаний

№ пп	$V_{изн}$ (мкм/ч.)	$M_{тр}$ (кгс·см)	$f_{тр}$	t (°С)
1	6,25	34,44-29,85	0,138-0,120	40,4-38,3
2	5,16	32,70-29,76	0,131-0,119	37,5-36,6
3	4,89	27,59-25,56	0,111-0,103	35,9-34,6
4	4,43	25,56-24,79	0,103-0,0995	34,6-34,0
5	2,73	24,60-23,68	0,099-0,095	33,8-33,3
6	0,00	25,85-24,69	0,104-0,099	32,3-31,1
7	1,86	24,55-22,31	0,0985-0,0895	32,3-32,5
8	2,13	23,75-21,37	0,095-0,086	31,1-30,8

Опыты продемонстрировали, что добавление в И-20А пропитанного графита с самого начала испытаний снижает скорость изнашивания по сравнению с непропитанным графитом в той же среде почти в 2 раза, и более чем в 3.5 раза по сравнению с чистым И-20А. Сопротивление относительно перемещению ($M_{тр}$ и $f_{тр}$) и температуры в среде исследуемой смазочной композиции также существенно ниже, чем в средах И-20А + графит и И-20А.

Этап III. Серия испытаний при повышенных нормальных силах. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

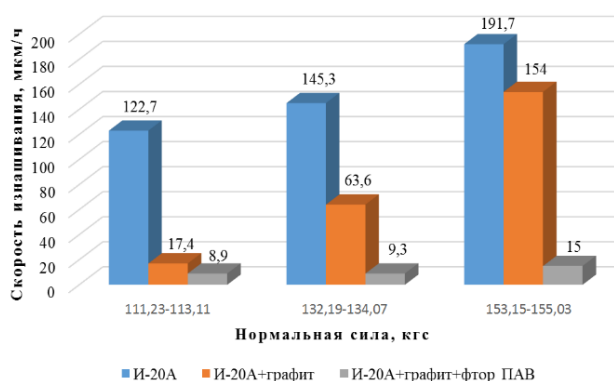


Рис. 2. Зависимость скорости изнашивания от приложенной нормальной силы в испытываемых средах

Заключение

1. По противоизносным свойствам наилучшие показатели продемонстрировала смазочная композиция И-20А + (графит + фтор - ПАВ) затем И-20А + (графит) и, наконец базовое масло И-20А.

2. С повышением значения приложенных нормальных сил, композиция И-20А + (графит) интенсивно догоняет И-20А, таким образом запас ее износостойкости быстро уменьшается. Скорость изнашивания в смеси базового масла с пропитанным графитом также возрастает, но остается в 6 – 12 раз меньшей, чем в каждой из исследуемых сред.

3. По сопротивлению относительному перемещению поверхностей (коэффициенту трения) наилучшие результаты измерений наблюдаются при низких нормальных силах у композиции И-20А + графит, при средних и высоких у И-20А + (графит + фтор - ПАВ), причем разница между ними с увеличением нормальных сил постоянно растет.

4. Минимальные значения температуры зафиксированы для среды с непропитанным графитом. Температуры в ней меньше при любой нагрузке, что связано с уменьшением проводниковых свойств графита вследствие обработки его диэлектрическим ПАВ.

[1] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Технология повышения износостойкости поверхностей трибосопряжений физико-химическим методом. Грузовик. 2015. № 3. С. 12-16.

[2] Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю. Адсорбция фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения. Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 113-124.

[3] ГОСТ 17022 – 81. Графит. Типы, марки и общие технические требования. Дата введения 01.01.1982 г.

[4] Гайдар С.М., Серяков А.В., Захаров Л.П., Васильев Д.Е. Патент RU 2 283 322 С1 от 04.07.2005 г.

[5] ГОСТ 23216-84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладоновыми смесями. Актуализация текста и описания 06.04.2015.

[3] МАСЛА ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ. Технические условия. Дата введения 01.01.1990 г.

ВЛИЯНИЕ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Барчуков Д.А., Измайлов В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е.*

*E-mail: ludmila.a@mail.ru

Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия.

Статья посвящена исследованию влияния газолазерной резки быстрорежущей стали Р6М5 на триботехнические свойства поверхности реза. Результаты могут быть востребованы при разработке новых технологий изготовления деталей и инструментов.

Ключевые слова: износостойкость, шероховатость, коэффициент трения, газолазерная резка, быстрорежущая сталь.

Введение

Газолазерная резка (ГЛР) широко используется для разделения различных классов материалов [1]. Во время ГЛР проходят процессы нагрева, плавления, испарения, химических реакций горения и удаления расплава из зоны реза с помощью вспомогательного газа [1]. В поверхностном слое реза формируется зона термического влияния, глубина которой зависит от режимов ГЛР. Многими исследователями отмечается, что материал в зоне термического влияния обладает улучшенными свойствами по сравнению с основным металлом и газолазерную резку при необходимости возможно использовать не только как разделительную операцию, но и одновременно упрочняющую обработку [2-7]. В работе [2] проведены комплексные исследования по влиянию параметров ГЛР на качество поверхности реза цепных звездочек из листовых сталей Ст3 и 30ХГСА толщиной 6 мм. Для данных марок сталей и выбранной толщины листа подтверждена возможность поверхностного упрочнения цепных звездочек при ГЛР.

Авторы статей [3, 4] изучали эффективность газолазерной резки нержавеющей стали. Отмечается, что микротвердость поверхностного слоя реза значительно увеличивается по сравнению с исходным состоянием, что связано с измельчением микроструктуры.

Во время ГЛР высокопрочной стали с помощью CO₂-лазера в зоне термического влияния происходит мартенситное превращение с

INFLUENCE OF GAS-LASER CUTTING ON THE WEAR RESISTANCE OF HIGH-SPEED STEEL

**Barchukov D.A., Izmailov V.V., Novoselova M.V.,
Afanasieva L.E.**

The article is devoted to the study of the effect of gas-laser cutting of R6M5 high-speed steel on the tribological properties of the cut surface. The results can be in demand in the development of new technologies for the manufacture of parts and tools.

Keywords: wear resistance, roughness, coefficient of friction, gas laser cutting, high speed steel.

образованием структуры закалки стали с повышенной твердостью [5].

Исследованию влияния режимов ГЛР (скорости резки и мощности лазерного излучения) на параметры шероховатости, фазовый состав и микротвердость поверхностных слоев реза инструментальных сталей посвящены работы [6, 7]. Показано, что шероховатость поверхности реза сопоставима с шероховатостью поверхностей после механической обработки и при определенных режимах может быть меньше, чем после механической или кислородной резки. Анализ микроструктуры инструментальных сталей после ГЛР показал, что в поверхностном слое реза на глубину ~200 мкм происходит повторная закалка сталей, что приводит к повышению микротвердости до 10600±160 МПа. Следует отметить, что для высоколегированных сталей свойства поверхностей газолазерного реза изучены недостаточно полно.

Целью настоящей работы является исследование износостойкости поверхности газолазерного реза быстрорежущей стали.

Материалы и методы

Заготовки быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73) размером 120×40×3,3 мм предварительно упрочняли по стандартной технологии – закалке и трехкратном отпуске при температуре 560 °С и разрезали на технологическом лазерном комплексе BySprint 3015 компании Bystronic на режимах: мощность излучения – 1800 Вт; скорость резки – 0,017 м/с; давление вспомогательного газа азота – 0,9 МПа.

По профилограммам, полученным на поверхностях реза определяли высотные и шаговые параметры микрогеометрии для профиля шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014: общую высоту профиля R_t , среднюю высоту элементов профиля R_c , среднее арифметическое отклонение профиля R_a .

Испытание на изнашивание проводили о закрепленный абразив по схеме шар – плоскость. В качестве контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна составлял 40...50 мкм.

К контакту прикладывали нормальное усилие 0,5 Н. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца осуществлялись электромеханическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой $\nu = 20$ Гц. Каждый образец подвергался испытанию в течение $t = 90$ мин. Путь трения составлял $L_{тр} = 1200...1400$ м. Перпендикулярно канавкам изнашивания записывали профилограммы, по которым определяли ширину D и максимальную глубину h канавки изнашивания. Рассчитывали характеристики изнашивания образца: линейный износ за цикл $I = h/(\nu \cdot t)$; скорость изнашивания $u = V/t$; линейную интенсивность изнашивания $I_h = h/L_{тр}$; объемную интенсивность изнашивания $I_V = V/L_{тр}$, где V – объемный износ (объем канавки износа).

Для определения коэффициента трения покоя поверхности реза использовали микротрибометр [8]. Поверхность образцов предварительно подвергалась механической полировке на алмазной пасте. В качестве контробразцов использовали сферические инденторы из циркония, золота, оксида алюминия Al_2O_3 . Выбор индентора связан с тем, что эти материалы не являются ферромагнетиками и практически не окисляются, обеспечивая воспроизводимость условий эксперимента. Коэффициенты трения определяли при нормальном усилии на контакт от 0,49 до 5,88 мН, которые создавали разновесами.

Результаты и обсуждение

Параметры микрогеометрии поверхностей газолазерного реза приведены в табл. 1. При обработке профилограмм согласно рекомендациям [8] длина оценки ln принята равной 4 мм в соответствии с величиной $Ra \approx 2$ мкм.

Табл. 1. Параметры шероховатости поверхности реза

R_t , мкм	R_c , мкм	R_a , мкм
15,0	8,1	1,96

Шероховатость поверхности после ГЛР ($Ra \approx 2$ мкм) меньше, чем типичная шероховатость после механической резки ($Ra > 3,2$ мкм [9]).

Помимо приведенных в табл. 1 числовых характеристик микротопографии поверхности, для поверхности после ГЛР была построена кривая коэффициента смятия профиля (ГОСТ Р ИСО 4287-2014), или опорная кривая (рис. 1). Это информативная комплексная характеристика микротопографии поверхности, наглядно показывающая распределение материала в шероховатом слое. По смыслу опорная кривая является интегральной функцией вероятности ординат профиля в пределах длины оценки. Площадь под кривой характеризует долю, занимаемую материалом в общем объеме шероховатого слоя.

Кривая построена в относительных координатах, где $\varepsilon = y/Rt$, y – уровень сечения профиля, отсчитанный от линии выступов; tp – коэффициент смятия профиля (относительная опорная длина профиля). По форме кривой можно заключить, что значительная доля объема материала содержится в верхних участках шероховатого слоя.

Форма опорной кривой важна при расчете объемного износа шероховатой поверхности, так как очевидно, что при одинаковой величине линейного износа объем изношенного материала в шероховатом слое меньше соответствующего объема сплошной среды (рис. 2).

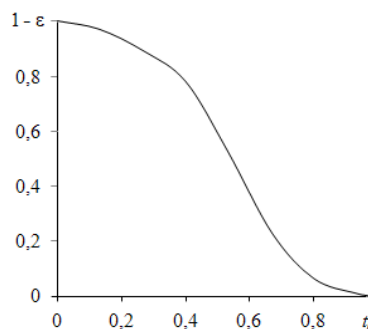


Рис. 1. Опорная кривая поверхности газолазерного реза быстрорежущей стали Р6М5

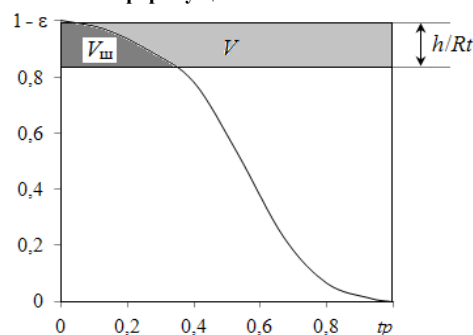


Рис. 2. Схематическое изображение объемов изношенного материала ($V_{ш}$ и V) для шероховатой и гладкой поверхности при одинаковой величине линейного износа h

Практически важной задачей является получение поверхностных слоев, обладающих повышенной износостойкостью. Результаты испытаний на абразивное изнашивание образцов представлены в табл. 2.

Табл. 2. Характеристики изнашивания поверхности реза

Вид обработки	$I, 10^{-7}$ мм/цикл	$u, 10^{-3}$ мм ³ /ч	$I_h, 10^{-8}$	$I_v, 10^{-14}$ м ²
ГЛР	2,27	10,7	1,89	1,23
Исходная	3,70	19,5	3,37	2,47

Известно, что при микрорезании линейная интенсивность изнашивания I_h составляет $10^0 \dots 10^{-4}$, при пластическом отгеснении – $10^{-4} \dots 10^{-9}$, при упругом – меньше 10^{-9} [10]. Во время проведения испытаний на изнашивание поверхностей реза быстрорежущей стали преобладали процессы пластического отгеснения.

ГЛР способствует снижению интенсивности и скорости изнашивания, то есть повышению износостойкости быстрорежущей стали. Причины повышения износостойкости быстрорежущей стали на поверхности газолазерного реза связаны со структурными превращениями и измельчением зерна при высокоскоростной перекристаллизации стали в зоне закалки. Результаты измерений коэффициента трения полированной поверхности образцов представлены в табл. 3.

Табл. 3. Значения коэффициента трения полированных поверхностей стали Р6М5

Нагрузка, мН	Исходная	ГЛР
	материал контрообразца цирконий	
0,49	0,24 ± 0,05	0,21 ± 0,01
0,98	0,13 ± 0,01	0,17 ± 0,02
1,96	0,09 ± 0,01	0,14 ± 0,02
2,94	0,10 ± 0,02	0,14 ± 0,01
3,92	0,10 ± 0,01	0,13 ± 0,01
5,89	0,10 ± 0,01	0,13 ± 0,01
	материал контрообразца корунд	
0,49	0,25 ± 0,04	0,22 ± 0,01
0,98	0,17 ± 0,01	0,18 ± 0,02
1,96	0,14 ± 0,01	0,15 ± 0,003
2,94	0,15 ± 0,02	0,15 ± 0,003
3,92	0,14 ± 0,01	0,14 ± 0,004
5,89	0,13 ± 0,01	0,14 ± 0,004
	материал контрообразца золото	
0,49	0,32 ± 0,06	0,23 ± 0,02
0,98	0,28 ± 0,03	0,20 ± 0,02
1,96	0,15 ± 0,02	0,12 ± 0,01
2,94	0,17 ± 0,01	0,12 ± 0,02
3,92	0,13 ± 0,01	0,11 ± 0,01
5,89	0,13 ± 0,01	0,11 ± 0,01

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать вывод, что быстрорежущая сталь марки Р6М5 после закалки и трехкратного отпуска и газолазерной резки имеет близкие значения коэффициента трения в исследованной области механических нагрузок, с повышением нагрузки величина коэффициента трения снижается по одинаковому закону.

Заключение

При газолазерной резке быстрорежущей стали формируется поверхность реза, имеющая шероховатость $Ra \approx 2$ мкм, что меньше, чем типичная шероховатость после механической резки. Характеристики изнашивания поверхности газолазерного реза в 1,6...2 раза меньше, чем у исходной поверхности (упрочненной закалкой и трехкратным отпуском), значения коэффициента трения близки.

- [1] Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрков. М.: МГТУ, 2006. – 664 с.
- [2] Минаев И.В., Тихонова И.В., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г., Архипова Е.А. Формирование поверхности реза и поверхностное упрочнение при лазерной резке звездочек цепных передач из сталей Ст3 и 30ХГСА // Деформация и разрушение материалов. – 2020. – № 9. – С. 16-21.
- [3] Hu C., Mi G., Wang C. Study on surface morphology and recast layer microstructure of medium thickness stainless steel sheets using high power laser cutting // Journal of Laser Applications. – 2020. – V. 32. – № 2. – P. 022033.
- [4] Miraoui I., Elimi E., Boujelbene M., Bayraktar E. Analysis of roughness and microstructure for high-power laser cutting of stainless steel // Advanced Science Letters. – 2013. – V. 19. – № 2. – P. 483-486.
- [5] Tahir, A.F.M., Rashid, A.R., Sariff, N.E. Rahim, E. A. CO₂ Laser Cutting Performance on Ultra High Strength Steel (UHSS) // Lasers in Manufacturing and Materials Processing. – 2020. – V. 7. – № 1. – P. 15-37.
- [6] Измайлов В.В., Барчуков Д.А., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Микрогеометрия поверхности и микроструктура газолазерного реза двухслойного стального материала // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 4. – С. 450-458.
- [7] Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Раткевич Г.В., Новоселова М.В., Гречишкин Р.М. Микроморфология поверхности и абразивная износостойкость инструментальной стали после газолазерной резки // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 12. – С. 46-53.
- [8] Патент РФ №2150688. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова; опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
- [9] Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». 2009. – 472 с.
- [10] Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИИ И АДСОРБЦИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ

Батова Л.В., Новиков В.В.*

*E-mail: novikov-ww@mail.ru

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», Иваново, Россия.

Работа посвящена моделированию диффузионных процессов в зоне фрикционного микрокапилляра. Предложена модель диффузионного формирования граничной смазочной пленки из трибоактивных присадок. Получены формулы, которые позволяют рассчитать кинетику формирования этой пленки. Расчет показал, что для модельной трибосистемы с присадкой X4 толщина формируемой пленки до ее разрушения при оптимальной концентрации составляет величину 0,85...1,25 нм. Это соответствует случаю планарного расположения молекул присадки в слое.

Ключевые слова: фрикционный микрокапилляр, граничное трение, смазка, присадки.

Введение

В процессе приработки на поверхности трения при граничной смазке складывается равновесная шероховатость, представляющая собой систему параллельных микроцарапин, возникновение которой обусловлено скольжением контактирующих выступов контртела, вызывающих пластическое оттеснение поверхностных объемов материала. Фрикционный контакт представляет собой плоский микрокапилляр с неровными шероховатыми стенками (рис. 1).

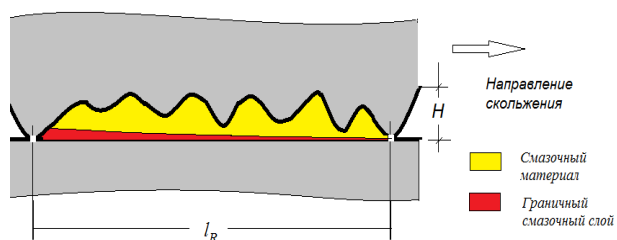


Рис. 1. Схема продольного сечения фрикционного микрокапилляра

Лишь часть наиболее выступающих шероховатостей контртела находятся в контакте с опорной поверхностью царапины. В процессе трения поверхность царапины в большем проценте времени остается ненагруженной и подвергается

SIMULATION OF DIFFUSION AND ADSORPTION OF SURFACTANT COMPONENTS OF A LUBRICANT UNDER BOUNDARY FRICTION

Batova L.V., Novikov V.V.

The work is devoted to modeling diffusion processes in the zone of a frictional microcapillary. A model of diffusion formation of a boundary lubricating film from triboactive additives is proposed. Formulas have been obtained that allow us to calculate the kinetics of the formation of this film of the film. The calculation showed that for a model tribosystem with an additive X4, the thickness of the formed film before its destruction at an optimal concentration is 0,85...1,25 nm. This corresponds to the case of the planar arrangement of the additive molecules in the layer.

Keywords: friction microcapillary, boundary friction, lubricant, additives.

периодическому воздействию только тогда, когда следующая микронеровность пройдет по данному участку вновь.

Из-за периодического воздействия граничный смазочный слой в местах контакта будет разрушаться, а после снятия воздействия восстанавливаться за счет диффузии молекул трибоактивных присадок из объема базовой жидкости. Скорость восстановления слоя будет зависеть от многих факторов, главным из которых является концентрация присадки в базовой жидкости. В наших работах [1,2] было показано, что оценочные расчеты дают возможность предсказывать теоретически оптимальное содержание присадок в базовой жидкости, когда их количество достаточно для того, чтобы успеть сформировать граничный смазочный слой оптимальной толщины.

Целью нашей работы являлось построение более строгой математической модели формирования этого слоя на основе моделирования процесса диффузии во фрикционном микрокапилляре.

Модель

При общем подходе для решения задачи формирования граничного слоя необходимо решать трехмерное уравнение диффузии в капилляре с точным описанием профиля контактирующих

поверхностей. Однако за того, что величина зазора и время формирования слоя между его разрушением мала, можно принять, что капилляр в двух измерениях бесконечно велик. Тогда решение диффузионной задачи можно свести к одномерному случаю, описываемому уравнением диффузии

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии, $C(x,t)$ – функция распределения концентрации трибоактивной присадки по высоте капилляра.

Поскольку граничный слой тонкий и его формирование не может сильно повлиять на общую концентрацию трибоактивной присадки в базовом растворе. Поэтому примем, что в начальный момент концентрация вещества во всем объеме одинакова и равна C_0 :

$$C(x,0) = C_0. \quad (2)$$

На стенке капилляра на участке, через который прошел микровыступ, будем считать, что поверхность обеднена присадкой. Поэтому имеет бесконечно большой коэффициент адсорбции. Любая молекула, достигшая поверхности, адсорбируется на ней. Это равносильно тому, что слой жидкости, прилегающей к стенке, полностью обедняется присадкой

$$C(0,t) = 0. \quad (3)$$

На противоположной стенке капилляра, напротив, адсорбционный слой уже сформирован, поэтому диффузионный поток на эту стенку отсутствует. Граничное условие будет выглядеть как

$$\frac{d}{dx} C(H,t) = 0, \quad (4)$$

где H – высота капилляра (рис. 1).

Уравнение (1) с начальным условием (2) и граничными условиями (3) и (4) решалось методом Фурье. Итоговое решение распределения концентрации присадки по высоте капилляра имеет вид ряда Фурье

$$C(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2C_0}{H\lambda} [1 - \cos(\lambda h)] e^{-D\lambda^2 t} \sin(\lambda x), \quad (5)$$

где $\lambda = \frac{\pi(1+2n)}{2H}$ – параметр формулы.

Зная распределение концентрации присадки в растворе от времени начала формирования этого слоя можно рассчитать толщину осажденного слоя. Пусть начальная масса присадки в растворе равна

m_0 . Тогда начальная концентрация C_0 определяется формулой

$$C_0 = \frac{m_0}{M + m_0} \approx \frac{m_0}{M}, \quad (6)$$

где M – масса жидкости в капилляре

Допустим, на стенке капилляра адсорбировалась масса присадки равная m_1 , следовательно, в растворе осталась масса присадки равная m_2 . Из выражения (6) получаем, что масса присадки на стенке капилляра равна

$$m_1 = m_0 - m_2 = MC_0 \left(1 - \frac{C_2}{C_0} \right), \quad (7)$$

где $C_2 = m_2/M$ – концентрация присадки, оставшейся в растворе и не осевшей на стенке.

Масса присадки на стенках определяется произведением плотности присадки на объем

$$m_1 = \rho_1 h S, \quad M = \rho H S \quad (8)$$

где ρ_1 – плотность присадки в слое, ρ – плотность смазочного материала, h – толщина слоя присадки на стенке капилляра, S – площадь поверхности капилляра.

Из выражений (7) и (8) следует, что

$$h(t) = H C_0 \left(1 - \frac{C_2(t)}{C_0} \right) \frac{\rho}{\rho_1}. \quad (9)$$

Концентрацию присадки, оставшейся в растворе легко определить, зная решение диффузионной задачи (5) и интегрируя полученное решение по пространству капилляра:

$$C_2(t) = \frac{1}{H} \int_0^H C(x,t) dx. \quad (10)$$

Таким образом, на основе формул (5), (9) и (10) можно рассчитать кинетику формирования слоя адсорбированных молекул присадки на стенку капилляра.

Для расчета коэффициента диффузии присадки использовали приближенную формулу Эйнштейна—Стокса

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r}, \quad (11)$$

где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, η – динамическая вязкость, r – размер молекулы.

Эксперимент

Расчеты конкретных параметров процессов нарастания толщины граничного слоя, состоящего из молекул присадки в капилляре, производились

путем математического моделирования на ЭВМ в пакете MathCad.

Для подстановки в выражение за основу были взяты данные оценочных расчетов параметра характерного фрикционного микрокапилляра:

1. Высота зазора между поверхностями в режиме гидродинамического трения, а следовательно, и во фрикционном капилляре при граничном трении $H \approx 0,4$ мкм.

2. Среднее время между воздействиями микронеровности на участок поверхности $t_R \approx 2,7$ мс.

Смазочный материал изготавливался на базе вазелинового масла ГОСТ 3164-78. В качестве модельной присадки был взят холестерилвый эфир валериановой кислоты X4, структурная формула которой приведена на рис. 2. Концентрации присадки в смазочном материале варьировались в диапазоне 0...4 масс. %.

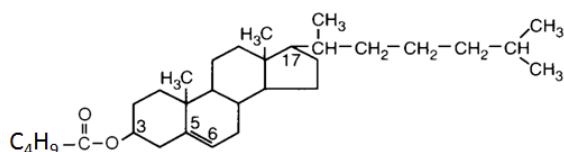


Рис. 2. Структурная формула X4

Для определения оптимальной концентрации присадки нами был выполнен эксперимент на трение на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск—колодка». Вращающийся диск изготавливался из закаленной стали 45 твердостью 58 HRC. Диаметр диска – 50 мм, ширина 11 мм.

Второй аналогичный диск закреплялся неподвижно. В результате получасовой приработки на поверхности неподвижного диска формировалась притертая зона трения длиной 8 мм, размеры которой оставались постоянными в течение всех последующих экспериментов.

Режим испытаний: скорость скольжения – 0,785 м/с (300 об/мин), нагрузка 100...1600 Н, давление на контакте – 1...20 МПа. Нагружение производилось ступенчато с шагом в 100 Н. Испытание прекращали при возникновении задира.

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 представлено распределение концентрации присадки в капилляре от времени с начала формирования пленки на поврежденной поверхности. Видно, что в процессе формирования участвуют только близ лежащие приповерхностные слои жидкости.

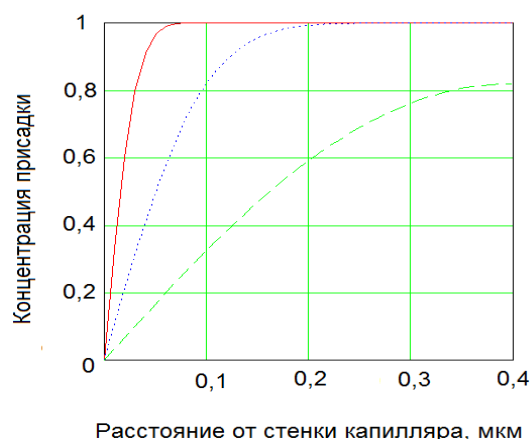


Рис. 3. Распределение концентрации присадки по высоте капилляра (расчет)

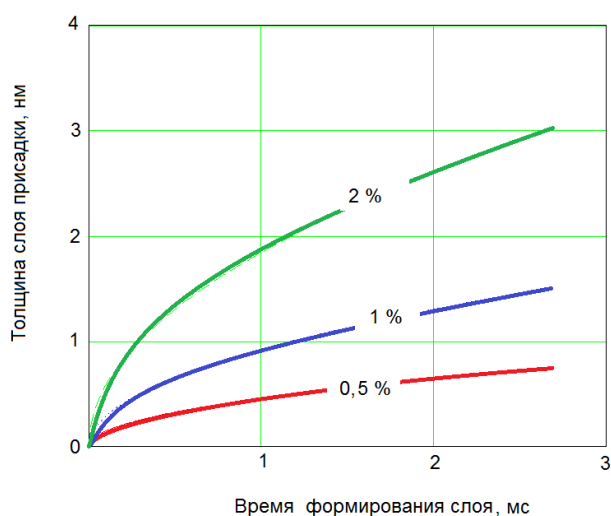


Рис. 4. Динамика роста смазочной пленки присадки на поврежденной поверхности трибокапилляра в зависимости от концентрации присадки в растворе (расчет)

Из рис. 4 видно, что толщина пленки, сформированной за определенное время, увеличивается с увеличением концентрации присадки. Так при концентрации присадки 0,05 масс. % толщина пленки после роста в течение 2,7 мс (время между воздействиями микронеровностей) составляет около 0,8 нм, при 2 масс. % — более 2,5 нм. Результаты расчетов по формуле (9) представлены в табл. 1

Табл. 1 Влияние времени адсорбции на толщину адсорбированного слоя

Время формирования слоя, мс	Концентрация присадки, масс. %		
	0,5	1	2
Толщина адсорбированного слоя, нм			
0,01	0,05	0,1	0,2
0,1	0,15	0,3	0,6
1	0,45	0,9	1,8

Полученные результаты оказалось возможным обобщить единой формулой

$$h = \frac{\rho}{\rho_1} C_0 \sqrt{Dt}, \quad (12)$$

где h – толщина сформированного слоя, C – доля присадки в растворе, D – коэффициент диффузии, t – время формирования адсорбированного слоя.

Если известна оптимальная толщина слоя, то из формулы (12) можно получить выражение для определения оптимальной концентрации присадки в растворе

$$C_{opt} = \frac{\rho_1}{\rho} \frac{h_{opt}}{\sqrt{Dt}}. \quad (13)$$

Подобное оценочное выражение использовалась нами ранее в работах [1,2]. Оно было получено ранее на основе приближенного решения уравнения диффузии. Это выражение отличается от нового численным коэффициентом. Проведенное нами более строгое моделирование процесса диффузии позволило уточнить предложенную ранее формулу.

Остается открытым вопрос об оптимальной толщине граничного слоя, сформированного на поверхности трибоактивной присадкой h_{opt} .

Результаты эксперимента по определению оптимальной концентрации присадки с точки зрения задиростойкости модельного узла трения представлены на рис. 5. Наибольшая задиростойкость достигается при концентрациях 0,5...1 масс. %.

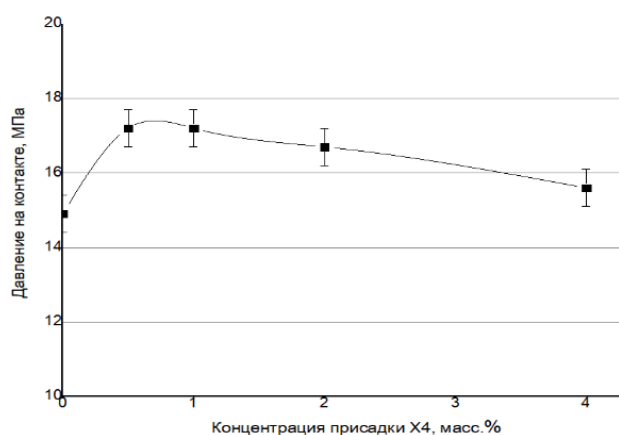


Рис. 5. Влияние концентрации присадки на контактное давление, при котором возникает задир (эксперимент)

Обращаясь к результатам расчета, можно сделать вывод о том, что наилучшими свойствами обладают именно тонкие пленки присадки, толщина которых находится в диапазоне 0,85...1,25 нм.

По данным литературы [3] размеры молекулы холестерина: 0,72×0,45×2,0 нм. Это означает, что наноразмерный граничный смазочный слой с наиболее оптимальными свойствами соответствует плоскому расположению молекул на трущейся поверхности, когда все молекулы наиболее полно покрывают поверхность, но не формируют более развитых по толщине и структуре граничных слоев.

Очевидно, именно того самого просто организованного слоя достаточно, чтобы экранировать адгезию между поверхностями и обеспечить свою высокую прочность за счет активного взаимодействия с металлической поверхностью всеми частями молекулы. В более толстых слоях молекулы присадки вступая во взаимодействия между собой уже не обеспечивают высокую стойкость такой пленки к разрушению под действием опорных шероховатостей фрикционного микрокапилляра.

Заключение

В результате проделанной работы построена модель диффузионного формирования граничной смазочной пленки из трибоактивных присадок. Получены формулы, которые позволяют рассчитать кинетику формирования этой пленки.

Расчет показал, что для модельной трибосистемы с присадкой X4 толщина формируемой пленки до ее разрушения при оптимальной концентрации составляет величину 0,85...1,25 нм. Это соответствует случаю планарного расположения молекул присадки в слое.

[1] Новиков В.В., Сырбу С.А. Кинетика формирования граничного смазочного слоя в зоне контакта стружка-инструмент при резании металлов // Трение и износ. – 2016. – Т. 37. – № 3. – С. 318-327.

[2] Новиков В.В. Влияние состава синтетических СОЖ на производительность шлифования стекла. // Известия Волгоградского Государственного Технического Университета. – 2017. – № 9 (204). – С. 102-105.

[3] Курик М.В. Холестерин: семь точек зрения. // «Химия и жизнь». – 1987. – № 1. – С. 66–70.

ВЛИЯНИЕ ГРУППОВОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА ОТРАБОТАННЫХ НЕФТЯНЫХ МАСЕЛ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТИЕВЫХ СМАЗОК

Белинов М.А., Гончарова М.А. Соловьев В.В.* , Соколов А.В., Данилова А.С.

*E-mail: solovyovvv@ystu.ru

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Россия.

Проблема повторного использования отработанных минеральных масел в промышленности чрезвычайно остро возникла в середине 2022 года из-за введенных экономических санкций против Российской Федерации, а также дефицита импортных присадок к основным видам базовых масел, выпускаемых отечественной промышленностью. В то же время проблема импортозамещения присадок к маслам возникла в рамках специальной военной операции и дальнейшего перевода этой отрасли промышленности (тонкой химической технологии) на рельсы отечественного производства.

Ключевые слова: минеральные масла, отечественная промышленность, импортозамещение, химическая технология.

Известно, что использование ряда нефтяных масел первой, второй и третьей группы, полученных традиционными способами нефтепереработки в качестве дисперсионной среды позволяет в определенной степени получать пластичные смазки, работоспособные в широком интервале температур для гражданской и военной техники [1]. В то же время большинством авторов утверждается, что на свойства смазок при низких и высоких температурах, кроме физико-химических характеристик (полученных различными способами) масел, значительно влияет их групповой и химический состав [2], который, как правило, зависит от типа нефти и месторождения ее добычи. Предварительными исследованиями было показано, что при соответствующей переработке отработанных нефтяных масел, заключающейся в их вакуумной разгонке, можно получить заранее заданный групповой и химический состав нефтяных масел. В представленной работе была предпринята попытка оценить влияние группового и химического состава полученных масел (после вакуумной перегонки отработанных нефтяных масел) на свойства литиевых смазок (Li-смазок) при положительных температурах.

INFLUENCE OF THE GROUP HYDROCARBON COMPOSITION OF SPENT PETROLEUM OILS ON THE LOW-TEMPERATURE PROPERTIES OF LITHIUM LUBRICANTS

Belinov M.A., Goncharova M.A. Soloviev V.V., Sokolov A.V., Danilova A.S.

The problem of reuse of used mineral oils in the industry became extremely acute in mid-2022 due to the economic sanctions imposed against the Russian Federation, as well as due to the shortage of imported additives to the main types of base oils produced by the domestic industry. The problem of import substitution of additives to oils arose especially acutely within the framework of a special military operation and the further transfer of this industry (fine chemical technology) to the rails of domestic production.

Keywords: mineral oils, domestic industry, import substitution, chemical technology.

Для получения групп углеводородов с преимущественным содержанием тех или иных классов соединений использовали отработанное минеральное масло, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

Хроматографическим методом по ГОСТ 11244-2018 был определен групповой состав отработанного масла. Усредненные значения состава выраженные в % мас. были следующими: парафино-нафтеновые углеводороды – 64,0; легкие ароматические углеводороды – 23; средние ароматические углеводороды – 11,4; смолы – 1,6. На следующем этапе выделяли группы углеводородов методом вакуумной разгонки с последующим использованием хорошо зарекомендовавшей себя методики разделения на силикагеле, модифицированной для работы в препаративном варианте. Основные показатели выделенных фракций приведены в табл. 2.

Химический состав групп углеводородов был исследован методом масс-спектрометрии. Как показали исследования, в насыщенной части разогнанного масла содержится более 30% парафиновых углеводородов, представленных соединениями преимущественно изостроения.

Табл. 1. Основные характеристики отработанного минерального масла

Наименование показателей	Значение
Вязкость кинематическая при 100 °С, м ² /с	5,6
Массовая доля механических примесей, % мас.	0,001
Массовая доля воды, % мас.	следы
Температура вспышки в открытом тигле, °С	183
Щелочное число, мг КОН/г	0,3
Кислотное число, мг КОН/г	0,3
Плотность ρ_4^{20} , кг/м ³	847
Зольность, % мас.	0,1

Среди нефтяных углеводородов преобладали моно- и бициклические соединения. В нефтяной фракции практически отсутствовали алкилбензолы, что свидетельствует о четко проведенном разделении при помощи силикагеля разогнанного под вакуумом масла на составляющие его группы углеводородов. Проведенные анализы фракции легких ароматических углеводородов показали, что она состоит преимущественно из алкилбензолов и тетралинов. Анализ фракции средних ароматических углеводородов показал, что она в основном состоит из би- и трициклических, а также серосодержащих ароматических углеводородов. В этой фракции было обнаружено наличие алкилбензолов, содержание которых колебалось в пределах 12-13%. Таким образом, все фракции разогнанного под вакуумом отработанного масла, которые в дальнейшем нами были использованы для приготовления литиевых смазок, значительно отличались по структурно-групповому и химическому составу. Который как ранее уже отмечалось можно варьировать при использовании различных видов отработанных минеральных масел.

Одновременно готовили смазки на исходном традиционном масле Ярославского НПЗ (ПАО «Славнефть-ЯНОС») SN-80 с добавкой различного количества смол. Все образцы смазок готовили по технологии, описанной в работе [3]. Расход оксистеарата лития во всех опытах составлял 7% мас. на готовую смазку. Низкотемпературные свойства смазок оценивали по вязкости на приборе СОД (ASTM D 1092-20) и крутящим моментам (пусковому и установившемуся режиму) по методу, аналогичному ASTM D 1478-68. Результаты исследований иллюстрируются рисунками 1 и 2, а в таблице 3 приведены данные по влиянию различного (варьируемого) группового состава нефтяного масла, полученного путем вакуумной разгонки отработанного масла на низкотемпературные свойства литиевых смазок.

Анализ полученных результатов показал, что хорошими низкотемпературными свойствами обладают смазки, приготовленные на парафино-нефтяных углеводородах. Их вязкость и крутящий момент при отрицательных температурах оказались значительно ниже по сравнению с теми же показателями смазок, приготовленных на фракциях легких и средних ароматических углеводородов (примерно в 3 и 6 раз и 3 и 10 раз, соответственно). Хотя вышеуказанные фракции парафиновые, легкие и средние ароматические углеводороды имеют довольно близкие температуры застывания, они, как и смазки, приготовленные на их основе, существенно различались по вязкости при температурах от минус 30 до минус 50 °С.

Таким образом было установлено, что температура застывания дисперсионной среды не может быть определяющим показателем при подборе масляных основ для низкотемпературных пластичных смазок, получаемых из отработанных масел.

Табл. 2. Основные показатели фракций углеводородов разогнанного отработанного масла

Показатели	Углеводороды		
	парафино-нефтяные	легкие ароматические	средние ароматические
Плотность ρ_4^{20} , кг/м ³	0,849	0,906	0,964
Кинематическая вязкость, м ² /с, при:			
50 °С	14,6	23,6	51,4
100 °С	4,2	5,3	7,8
Индекс вязкости	100	61	29
Вязкость, Па·с (П), при 10 с ⁻¹ и -50 °С	290	1320	2050
Анилиновая точка, °С	111	60,1	28,5
Температура застывания, °С	-45	-44	-36
Удельная дисперсия	100	140	170
Испаряемость при 100 °С, 1 ч, % мас.	1,1	0,8	0,6
Молярная масса г/моль	350	316	326
Коэффициент рефракции n_D^{20}	1,4716	1,5074	1,5412

Табл. 3. Влияние различного (варьируемого) группового состава нафтенного масла, полученного путем вакуумной разгонки отработанного масла на низкотемпературные свойства литиевых смазок

Групповой состав углеводородов, % мас.	Вязкость, Па·с, при 10 с ⁻¹			Крутящий момент (пусковой/установившийся), гс·см.		
	-50 °С	-30 °С	0 °С	-50 °С	-30 °С	0 °С
Парафино-нафтенные, 100	1250	144	56	860/330	290/240	190/140
Легкие ароматические, 100	4200	5200	130	2300/1200	640/410	250/200
Средние ароматические, 100	9000	2000	200	9300/2700	1800/1400	460/380
Парафино-нафтенные, 65 Легкие ароматические, 33	1400	160	58	940/610	320/180	210/140
Парафино-нафтенные, 50 Легкие ароматические, 50	1900	270	135	1500/1100	360/280	250/180
Парафино-нафтенные, 25 Легкие ароматические, 75	3600	320	140	2200/1300	470/360	280/180
Парафинонафтенные, 65 Легкие ароматические, 25 Средние ароматические, 10	1650	2300	67	900/260	360/210	220/160
Парафино-нафтенные, 65 Легкие ароматические, 10 Средние ароматические, 25	1800	240	79	1100/340	450/240	280/200
Парафино-нафтенные, 50 Легкие ароматические, 25 Средние ароматические, 25	2000	260	91	1740/490	540/290	310/170
Парафино-нафтенные, 40 Легкие ароматические, 25 Средние ароматические, 35	6000	550	112	2700/1300	730/400	300/250

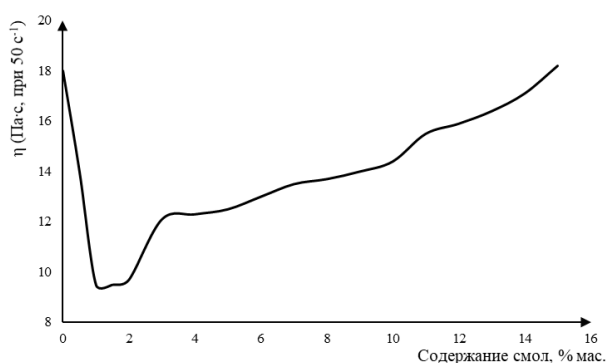


Рис. 1. Изменение вязкости от содержания смол

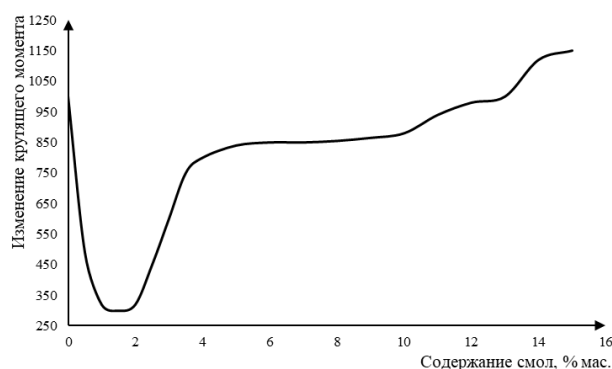


Рис. 2. Изменение крутящего момента от содержания смол

Смазки, приготовленные на смесях фракций, по низкотемпературным свойствам занимают промежуточное положение и по требованиям ГОСТ 14892-69, вполне пригодны для работы в условиях Севера даже при температуре -50 °С. Смазки, в состав которых наряду с парафино-нафтенными углеводородами входит до 50% мас. легких ароматических углеводородов, а также смазки, приготовленные на смеси всех трех углеводородных фракций при следующих соотношениях, % мас.: парафино-нафтенных – 50-65; легких ароматических – 25; средних ароматических – 10-25 вполне пригодны к эксплуатации.

Содержание смол в масле (см. рис. 1 и рис. 2) влияет на вязкость и крутящий момент смазок при низких температурах. Наблюдается экстремальная зависимость этих показателей от содержания смол в дисперсионной среде. Минимальное значение вязкости и крутящего пускового момента соответствует содержанию ~ 1,5-1,8 % мас. смол в масле.

Дальнейшее увеличение концентрации смол (от 1,8 до 15% мас.) способствует существенному увеличению рассматриваемых показателей, хотя последние практически лежат в пределах, характерном для смазок на исходном масле. Однако, учитывая тот факт, что с ростом содержания смол в масле значительно ухудшается коллоидная стабильность и снижаются пределы прочности на сдвиг соответствующих смазок, содержание смол в маслах не должно превышать определенной концентрации.

Исходя из данных табл. 3 и рисунков 1 и 2, можно составить предварительные требования к химическому и групповому составу нефтяных масел для производства низкотемпературных смазок из отработанных нефтяных масел; содержание углеводородных фракций в нефтяном масле для низкотемпературных смазок должно составлять, % мас.: парафинонафтенных – не менее 50, средних ароматических – не более 25, смол – около 1,5, остальная часть – легкие ароматические

углеводороды (до 100). Таким образом, имея различные отработанные масла после их соответствующей вакуумной перегонки можно получать набор различных углеводородных фракций, после варьирования которых можно приготовить базовые смеси компонентов минеральных масел для синтеза на их основе дисперсных литиевых смазок, обладающих полезными в технологическом плане свойствами.

[1] Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899 Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации.

[2] Каталог базовых масел - Промэкспорт.[Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.yanos.slavneft.ru/production/products/> Режим доступа: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2020-november/5117331/>

[3] Селезнева И.Е., Левин А.Я., Трофимова Г.Л., Иванова О.В., Будановская Г.А. Новая сверхщелочная алкилфенольная присадка к моторным маслам // Химия и технология топлив и масел. – 2009. – № 4. – С 10-12.

[4] Манг Т. Смазки материалы. Производство, применение, свойства: справочник / Манг Т., Дрезель У. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010 – 944 с.

БЕЗЗОЛЬНЫЕ ТИО-И ДИТИОФOSFATНЫЕ ПРИСАДКИ, СНИЖАЮЩИЕ ТРЕНИЕ И ИЗНОС

Белинов М.С., Малышкина О.В., Гончарова М.А., Соловьев В.В.* , Соколов А.В.

*E-mail: solovyovvv@ystu.ru

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Россия.

С учетом экономических санкций, введенных в 2022 году в отношении Российской Федерации, перед отечественной нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленностью была поставлена важнейшая задача – обеспечить производство отечественных смазочных материалов высокоэффективными многофункциональными присадками отечественного производства. Особый интерес в настоящее время приобретают такие добавки к моторным маслам, которые могут снижать не только износ, но и трение сопряженных пар.

Ключевые слова: присадки, масла, импортозамещение.

Это, как правило, беззольные высокотемпературные антифрикционные присадки, или модификаторы трения. В ходе проведенных исследований было показано, что синтезированные по известным методикам тио- и дитиофосфаты, содержащие в своем составе аминные фрагменты, улучшают антифрикционные свойства масел в интервале температур 20-300 °С при низких скоростях скольжения и невысоких нагрузках. Из беззольных присадок, полученных в настоящей работе, только амидотиофосфаты позволяют существенно снизить износ и могут быть рекомендованы к замене импортных аналогов.

ASH-FREE THIO- AND DITHIOPHOSPHATE ADDITIVES THAT REDUCE FRICTION AND WEAR

**Belinov M.S., Malyshkina O.V., Goncharova M.A.,
Soloviev V.V., Sokolov A.V.**

Taking into account the economic sanctions imposed in 2022 against the Russian Federation, the domestic oil refining and petrochemical industry was given the most important task – to ensure the production of domestic lubricants with highly effective multifunctional additives of domestic production. Of particular interest at present are such additives to motor oils that can reduce not only wear, but also the friction of conjugated pairs.

Keywords: additives, oils, import substitution.

С учетом экономических санкций, введенных в 2022 году в отношении Российской Федерации, перед отечественной нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленностью была поставлена важнейшая задача – обеспечить производство собственных смазочных материалов высокоэффективными многофункциональными присадками отечественного производства. Отмечается, что прогресс в российском моторо- и машиностроении на современном этапе во многом будет связан с постепенным переходом отечественного машинного парка на смазочные материалы, производство добавок к которым было

утрачено Российской Федерацией за последние 30 лет. Это отчасти было связано с тем, что производство присадок не является технологически сложным и многотоннажным процессом (скорее мелкосерийным), поэтому большинство из этих продуктов малотоннажной химии отечественными потребителями закупалось по импорту. Однако в последнее время вопрос о необходимости технологического суверенитета страны, поставил перед малыми предприятиями задачу вернуть на промышленный рынок такие материалы или их аналоги. Особый интерес в настоящее время приобретают такие добавки к моторным маслам, которые могут снижать не только износ, но и трение сопряженных пар. Это, как правило, беззольные высокотемпературные антифрикционные присадки, или модификаторы трения.

Известно, что амидотиофосфаты выпускаемые зарубежными производителями проявляют отличные противоизносные и антифрикционные свойства [1], однако их синтез является достаточно сложным процессом, который запатентован преимущественно иностранными производителями [2]. Близкими к амидотиофосфатам по содержанию активных элементов S, P, N и O являются соли тиофосфорных кислот и различных аминов. При этом соли дитиофосфорных кислот и аминов содержат больше серы по сравнению с солями тиофосфорной кислоты и тех же аминов.

В данном сообщении приведены результаты исследования антифрикционных и противоизносных свойств амидотиофосфатов (АТФ), солей тиофосфорной кислоты (ТФК) и дитиофосфорной кислоты (ДТФК), а также аминов распределённых в минеральном масле SN-80, производимом ПАО «Славнефть ЯНОС». Для сравнения полученных результатов использовали традиционный, уже сегодня выпускаемый отечественной промышленностью зольный модификатор трения — ди (алкилфенил) дитиофосфат молибдена (ДТФ Мо). Все присадки были получены на основе промышленных образцов алкилфенолов по известным стандартным методикам [3]. Для синтеза амидотиофосфатов и солей тио- и дитиофосфорной кислоты и аминов использовали отечественные этилендиамин (ЭДА) и диэтилентриамин (ДЭТА).

Образцы присадок растворяли в масле SN-80 в концентрации 2% мас. Антифрикционные свойства масел с присадками определяли на машине КТ-2 по ГОСТ 23.221-84 и на четырехшариковой машине трения (ЧШМ). Противоизносные свойства масел определяли на машине SRV и контролировали на четырехшариковой машине трения – ЧШМ.

В машине КТ-2 [4] в качестве образцов (тел трения) были использованы шарики диаметром 8 мм из стали ШХ15. Температурный интервал испытаний варьировался от 20 до 300 °С, продолжительность испытаний при каждой заданной температуре масла в объеме составляла во всех опытах 60 секунд. Критерием оценки антифрикционных свойств масел в данных условиях являлся коэффициент трения образцов f .

Испытание на износ и трение проводилось на платформе Optimol SRV-4. Для этого использовали геометрию «цилиндр на плоскости». Цилиндр из закаленной стали имел размеры 11 x 15 мм (диаметр x длина). Держатель кюветы для образца изготавливали при обеспечении соответствия размерам из стальных дисков (6,9 x 22 мм). Кювета для образца удерживала 2 мл масла и обеспечивала проведение в машине SRV испытания для смазки при увеличенной продолжительности процесса при полном погружении цилиндра в масляную ванну. Применяемая при испытаниях компоновка в отношении пазов центровочных пальцев делала возможным расположение кюветы, которая находилась на 5 мм либо слева, либо справа в камере для образцов машины SRV (в дополнение к центральному расположению). Все это позволило проводить сразу по три независимых испытания с ходом до 3 мм на каждой стороне диска. Дисковые образцы были изготовлены производителем либо из стали, либо из стали с нанесенным алмазоподобным покрытием (при испытании использовались оба образца); цилиндр всегда имел стальную поверхность. Два образца для испытаний (например, цилиндр и диск) устанавливали в камере для испытаний и сдавливали друг с другом при использовании указанного нормального усилия. При этом верхний образец всегда осциллирует на нижнем образце. Частоту, ход, нагрузку при испытании, температуру при испытании и продолжительность испытания задавали предварительно, при этом, силу трения непрерывно измеряли. В течение всей продолжительности испытания автоматически рассчитывали и регистрировали коэффициент трения. Объем износа измеряли и регистрировали или во время, или после испытания.

Для контроля данных, полученных на импортной платформе Optimol SRV-4 по износу и трению, испытания полученных масел дублировались на четырехшариковой машине трения ЧШМ, которые проводились по стандартной методике. Использовали шарики из стали ШХ15 диаметром 12,7 мм, продолжительность испытаний

во всех случаях составляла 6 ч. Во время испытаний регистрировали коэффициент трения f_t , по которому судили об антифрикционных свойствах масел. Противоизносные свойства масел оценивали по диаметру пятна износа шариков D_w , определяемому через 0,5; 1 ч и далее через каждый час работы машины.

При испытании масел с присадками на машине КТ-2 было установлено, что амидотиофосфаты № 1 и 2 значительно улучшают антифрикционные свойства масел. Образцы, работающие в маслах с этими присадками, имеют низкий коэффициент трения (0,05-0,08) во всем исследованном интервале температур (см. рис. 1).

Соли тиофосфорной кислоты и аминов (№ 4 и 5), как показали исследования, позволяют снизить коэффициент трения образцов до значений 0,07-0,11 (см. рис. 2). При испытании на машине КТ-2 величина коэффициента трения для образцов, работающих в масле, содержащем соль ДТФК и ДЭТА и соль ТФК и того же амина, оказалась приблизительно одинакова при температуре работы машины выше 100 °С.

Образцы, работающие в масле с присадкой ДТФ Мо, до температуры 200 °С имели коэффициент трения ~ 0,06, а при повышении температуры до 270 °С коэффициент трения постепенно снижался до значения ~ 0,04.

В ходе предварительного исследования было установлено, что практически все исследованные в настоящей работе присадки позволяют снизить коэффициент трения образцов в 2-5 раз при температуре выше 150 °С. Для сравнения на рис. 2 представлена зависимость коэффициента трения от температуры образцов, работающих в базовом масле SN-80.

В условиях испытаний на машине КТ-2 при невысоких скоростях и нагрузках, где преимущественное снижение трения происходит за счет образования на поверхностях трения адсорбированных слоев присадки или продуктов ее термического разложения, все три типа исследованных беззольных присадок проявляли приблизительно одинаковые антифрикционные свойства. Существенной разницы между беззольными присадками и ДТФ Мо не было обнаружено.

Исследование масел на износ и трение на машинах Optimol SRV-4 и ЧШМ показало, что в данных условиях трения беззольные S-, P-, N- и O-содержащие присадки не снижают коэффициент трения образцов по сравнению с базовым маслом

SN-80 или снижают его незначительно. Зависимость приведена в табл. 1.

Установлено, что амидотиофосфаты стабилизируют коэффициент трения в течение всего времени испытаний. Для образцов, работающих в маслах с добавками солей ДТФК и аминов, значение коэффициента трения возрастало с увеличением продолжительности испытаний. Показано, что соль ДТФК и ДЭТА и амидотиофосфаты снижают коэффициент трения приблизительно одинаково. К сожалению, соли ТФК и аминов несколько ухудшали антифрикционные свойства базового масла.

В условиях испытаний на ЧШМ только ДТФ Мо позволяет снизить коэффициент трения образцов до значений 0,07-0,09, т. е. в 2-3 раза по сравнению с базовым маслом.

Амидотиофосфаты показывают лучшие противоизносные свойства по сравнению с солями ТФК и ДТФК и аминов. Зависимость приведена в табл. 2.

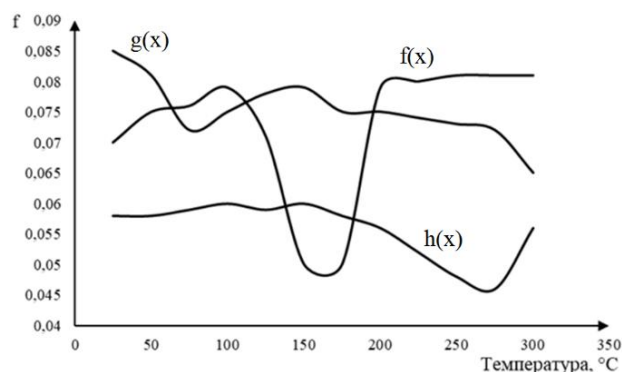


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от температуры для масла SN-80: g(x) – АТФ на основе ДЭТА, f(x) – АТФ на основе ЭДА, h(x) – ДТФ Мо

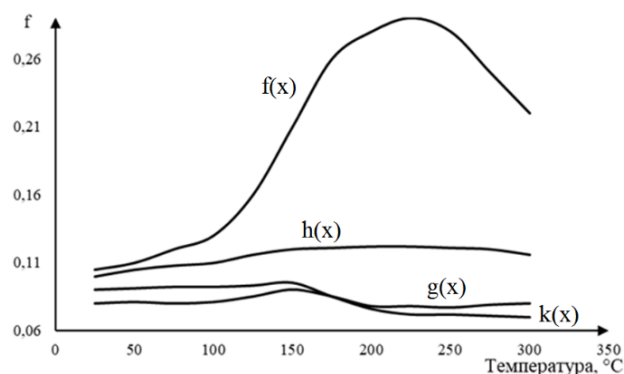


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от температуры для масла SN-80: g(x) – соль ТФК и ДЭТА, f(x) – масло SN-80, h(x) – соль ТФК и ЭДА, k(x) – соль ДТФК и ДЭТА

Табл. 1. Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытаний масел с присадками на машинах Optimol SRV-4 и ЧШМ

Присадка	Коэффициент трения образцов после испытания в течение, ч						
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
АТФ на основе:							
ДЭТА	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
ЭДА	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Соль:							
ДТФК и ДЭТА	0,17	0,19	0,17	0,19	0,19	0,19	0,19
ТФК и ДЭТА	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20	0,21
ТФК и ЭДА	0,18	0,20	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
ДТФ Мо	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08
Масло SN-80	0,19	0,19	0,20	0,21	0,20	0,21	0,20

При испытании амидотиофосфатов диаметр пятна износа шариков через 1 ч составлял 0,30-0,32 мм, через 6 ч испытаний 0,41 мм. Шарики, работающие в маслах с добавками солей ТФК и ДТФК и аминов, через 1 ч испытаний имели $D_{и}$ 0,36-0,51 мм, а через 6 ч 0,51-0,65 мм.

Табл. 2. Зависимость износа шариков от продолжительности испытаний масел с присадками на ЧШМ

Присадка	$D_{и}$ мм, после испытания в течение, ч						
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
АТФ на основе:							
ДЭТА	0,31	0,32	0,35	0,38	0,40	0,41	0,41
ЭДА	0,29	0,30	0,33	0,35	0,37	0,40	0,41
Соль:							
ДТФК и ДЭТА	0,37	0,40	0,45	0,48	0,52	0,55	0,58
ТФК и ДЭТА	0,32	0,36	0,38	0,44	0,46	0,49	0,51
ТФК и ЭДА	0,43	0,51	0,50	0,57	0,60	0,04	0,65
ДТФ Мо	0,31	0,32	0,35	0,36	0,38	0,39	0,40
Масло SN-80	0,50	0,85	1,00	1,15	1,23	1,32	1,40

По противозносным свойствам амидотиофосфаты близки к присадке ДТФ Мо. В данном случае, когда взяты одинаковые массовые доли присадок в масле, влияние строения амина в присадках на смазочную способность масел сказывается незначительно.

Таким образом, тио- и дитиофосфаты, содержащие в своем составе аминные фрагменты, улучшают антифрикционные свойства масел в интервале температур 20-300 °С при низких скоростях скольжения и невысоких нагрузках. В условиях высоких скоростей и нагрузок исследованные присадки ухудшают антифрикционные свойства масел (соли ТФК и аминов) или улучшают их незначительно (АТФ). Из беззольных присадок только синтезированные в настоящей работе амидотиофосфаты позволяют существенно снизить износ и могут быть рекомендованы к замене импортных аналогов.

[1] Экологические аспекты химмотологии смазочных материалов / Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Облащикова И.Р. М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001, с. 115-116.

[2] Пат. 2709211С2 Российская Федерация, МПК С10М141/06, С10М141/08, С10М159/12, С10М133/04, С10М169/04, С10Н30/06, С10Н40/25. Смазывающая композиция / Саутби Марк Клифт, Де Руй Серджио; заявитель и патентообладатель Шелл интернэшнл рисерч маатсхаппий Б.В. – № 2017113940-21; заявл. 21.09.15; опубл. 17.12.19.

[3] Пат. 2427615С2 Российская Федерация, МПК 159/20, С10Н 40/25. Композиция смазочного масла / Сэнт Питер, Уилларс Малком Дж., Буссе Петер, Леонхардт Хельмут; заявитель и патентообладатель Шелл интернэшнл рисерч маатсхаппий Б.В. – № 2006140774/04; заявл. 17.11.06; опубл. 27.08.11.

[4] Смазки материалы. Производство, применение, свойства: справочник / Манг Т., Дрезель У. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010 – 944 с.

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФАЗЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

Бирюков В.П.

E-mail: laser-52@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт машиноведения
им. А.А. Благодрава РАН, Москва, Россия.

В работе приведены результаты металлографических и триботехнических исследований многокомпонентных сплавов с добавлением в шихту карбидов титана. Показано, что увеличение мощности и уменьшение скорости приводит к росту ширины и высоты наплавленных валиков. Применение поперечных колебаний луча повышает производительность обработки. Износостойкость покрытий с ультрадисперсными керамическими частицами в 2,2 раза выше, чем многокомпонентных сплавов. Предельная нагрузочная способность покрытий с карбидами намного выше, чем покрытий без карбидов.

Ключевые слова: лазерная наплавка, микротвердость, интенсивность изнашивания, критическая скорость скольжения.

Введение

Металлокерамическое композитное покрытие, полученное методом лазерной наплавки, обладает преимуществами высокой твердости, отличной износостойкости и коррозионной стойкости [1]. Оно обычно используется в качестве износостойкого и коррозионностойкого покрытия для буровых штанг и деталей для судов, которые работают в экстремальных условиях [2]. В качестве порошков для лазерной наплавки [3] использовали NiCrBSi (1560, Hognas, Бельгия). Были исследованы три различных размера порошков карбида вольфрама сферической формы с размером частиц: 40-160, 250– 400 и 750 – 1200 мкм. Во всех случаях в качестве подложек использовались пластины из низкоуглеродистой стали S235JR с размерами 120×120×10 мм. Для лазерной наплавки покрытий использовали установку с максимальной мощностью 3,8 кВт (HPDL), с длиной волны 870 нм. Обработку выполняли пятном диаметром 4 мм при мощности 1,5 кВт, скорости сканирования 700 мм/мин, при расходе порошка 25 г/мин, с перекрытием дорожек 50%. Перед наплавкой

EFFECT OF THE HARDENING PHASE ON THE MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF COATINGS OBTAINED BY LASER SURFACING

Biryukov V.P.

The paper presents the results of metallographic and tribotechnical studies of multicomponent alloys with the addition of titanium carbides to the charge. It is shown that an increase in power and a decrease in speed leads to an increase in the width and height of the deposited rollers. The use of transverse beam vibrations increases processing performance. The wear resistance of coatings with ultrafine ceramic particles is 2,2 times higher than that of multicomponent alloys. The ultimate load capacity of coatings with carbides is much higher than coatings without carbides.

Keywords: laser surfacing, microhardness, wear intensity, critical sliding speed.

металлический и керамический порошки помещали в отдельные емкости, а затем подавали в коаксиальное сопло. Объемные доли керамики составляли от 0% до 30%. Чтобы избежать растрескивания наплавку выполняли путем нагрева подложек при 400°C. Износостойкость оценивалась по схеме «диск (образец с покрытием) - шар (диаметром 10 мм из WC-Co)» в течение 2 ч с постоянной линейной скоростью 0,1 м/с. Наилучшие результаты показали образцы с размерами частиц и 40-160 мкм.

В качестве подложки в процессе лазерной наплавки [4] использовалась высокохромистая ферритная сталь размером 100×60×20 мм. Композиционные порошки представляли собой смесь 9:1 порошка на основе кобальта HMSC 2528 с размером частиц 70-150 мкм и частиц TiC, а также CeO₂ в количестве 0, 0,5 и 1,5 мас.%. Для обработки использовали твердотельный Nd:YAG лазер с мощностью излучения 1800 Вт, скоростью перемещения луча 160 мм/мин, диаметре пятна 0,7 мм, с перекрытием дорожек 30%. Размер зерен в

слое лазерной наплавки уменьшен с 9,8 мкм до 5,1 мкм с увеличением содержания CeO_2 с 0 мас.% до 1,5 мас. %. Добавление CeO_2 позволило увеличить трещиностойкость и коррозионную стойкость слоев лазерной наплавки.

Порошки высокоэнтропийного сплава [5] (ВЭС) FeCoNiCr с размером частиц 45-150 мкм были получены распылением при атомном соотношении 1:1:1:1. В состав шихты вводили 60% порошка карбида вольфрама с размером частиц 45-65 мкм. Для материала подложки выбрана сталь 316L с размерами образцов $100 \times 100 \times 10$ мм. Оборудование для лазерной наплавки - TruDisk6006 с максимальной мощностью излучения 6000 Вт. Для подачи порошка использовали гелий, а в качестве защитного газа - аргон. Параметры процесса лазерной наплавки были выбраны следующим образом: диаметр пятна 4 мм, мощность луча лазера 1600 Вт, скорость сканирования 10 мм/с, расход порошка 10,5 г/мин, с перекрытием дорожек 50%. Для оценки трибологических характеристик использовалась машина трения скольжения MS-T3001. Параметры испытаний на трение и износ были следующими: нагрузка 1000 г, радиус износа 4,5 мм, время испытания 30 минут и частота вращения 400 мин⁻¹. В качестве контртела был выбран шарик из нитрида кремния. Полученное композитное покрытие состояло из большего количества фазы ГЦК с меньшим количеством WC, W₂C и фазы Co₄W₂C. Микроструктура композитного покрытия представляла собой в основном дендритные зерна без очевидной текстуры. Средняя микротвердость композитного покрытия составляла 506 HV0.05. Средний коэффициент трения и потери объема при износе были 0,474 и 0,041 мм³.

В качестве материала основы для лазерной наплавки [6] применяли штамповую сталь 4Cr5MoSiV1 с размерами образцов 80 мм × 60 мм × 10 мм. Порошок ВЭС Fe-Co-Cr-Ni-Mn использовали при соотношении легирующих элементов 1:1:1:1:1, и они имели чистоту 99,0–99,5% с размером частиц 20-80 мкм. Чистота керамических частиц TiC добавляемых в шихту была 99,5%, размер частиц 10-20 мкм, их количество составляло 0, 5, 10 и 15 мас.%. Обработку проводили при мощности лазера 1300 Вт, диаметре пятна 3 скорости сканирования 6 мм/с, с коэффициентом перекрытия дорожек 30%. Износостойкость слоев покрытия Fe-Co-Cr-Ni-Mn + x(TiC) при комнатной температуре изучали с помощью тестера абразивного износа MDW-02. Материалом, выбранным для контртела, был шарик из твердого сплава YG6 (HV 1521). Толщина и

диаметр образцов дисков составляли 3 мм и 20 мм соответственно. Испытания выполняли при частоте двойных ходов 65 мин⁻¹, нагрузке 30 Н, продолжительности 1 ч и скорости радиальной подачи 4 мм/с. Покрытия Fe-Co-Cr-Ni-Mn + 10 мас.% TiC показали наилучшие свойства по износостойкости. Покрытия с низким содержанием керамических частиц было склонно к адгезионному износу. Кроме того, избыточное содержание керамических частиц ускорило их отслаивание на поверхности покрытия. Коэффициенты трения для покрытий ВЭС Fe-Co-Cr-Ni-Mn и с добавлением 5, 10, 15 масс.% составляли 0,4688, 0,3688, 0,3415 и 0,4039 соответственно.

Цели и задачи исследования

Целями настоящей работы было получение многокомпонентных металлокерамических покрытий с введением в порошковую шихту карбида титана и определение оптимальных режимов наплавки, механических и триботехнических свойств покрытий.

Материалы и методы исследований

Для лазерной наплавки использовали образцы стали 40X2H2M с размерами $12 \times 20 \times 70$ мм. Эксперименты выполняли на автоматизированном лазерном комплексе ИМАШ РАН. Использовали порошки в соотношении 3:1 на железной Fe-Cr-Si-Mn-V и никелевой основе Ni-Cr-Si-B-Fe с добавлением ультрадисперсных и серийных порошков карбида титана для напыления и наплавки (TiC) в количестве 5 об.% с размером частиц 0,5-15 мкм и 40-100 мкм - 10 об.%. Изменяемыми параметрами были мощность излучения P = 700-1000 Вт, скорость перемещения V = 7-9 мм/с, расфокусировка луча 1,8 – 3,2 мм. Дополнительно применяли поперечные колебания луча с частотой 215 Гц. Металлографические исследования были выполнены на цифровом и металлографическом микроскопах. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3.

Триботехнические испытания выполняли по схеме «плоский образец с наплавкой – кольцевая поверхность контробразца втулки (сталь 40X, HRC 48-53). Для смазки использовали масло гидравлическое МГЕ-10А.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 а, б представлены микрошлифы зон лазерной наплавки с применением поперечных колебаний лазерного луча при различных режимах обработки. Ширина и высота наплавленного единичных валиков при наплавке расфокусированным и колеблющимся лучом составила 1,5-2,3, 0,46-0,78 и 2,7-4,1 и 0,45-0,76 мм

соответственно. Из полученных результатов следует, что производительность лазерной наплавки при поперечных колебаниях луча в 1,4-2,1 раза выше, чем при обработке расфокусированным лучом.

С увеличением мощности и уменьшением скорости обработки высота и ширина наплавленных валиков увеличиваются, однако микротвердость при этом несколько снижается. При наплавке порошка без карбидов и с их добавкой 5 и 10% микротвердость покрытий составила 6490-7680, 7240-8530 и 6890 – 8320 МПа соответственно.

На рис. 2 представлены зависимости критических давлений от скоростей скольжения, при которых наступает мгновенное повышение коэффициентов трения или схватывание поверхностей трения.

При давлении в паре трения 4 МПа заедание наступает для многокомпонентного покрытия при скорости скольжения 0,3 м/с, а для покрытия с ультрадисперсными карбидами при скорости скольжения 0,9 м/с. Таким образом при высоких давлениях предельные скорости увеличиваются в 3 раза по сравнению с наплавкой многокомпонентными сплавами без карбидов. При дальнейшем снижении давлений превосходство покрытий с TiC сохраняется, но несколько в меньших масштабах. Так при давлении 2 МПа критическая скорость для покрытия без карбидов составляла 1,3 м/с, а с карбидами 2,2 м/с, т.е. она увеличивается в 1,69 раза.

Интенсивность изнашивания образцов представлена в табл. 1.

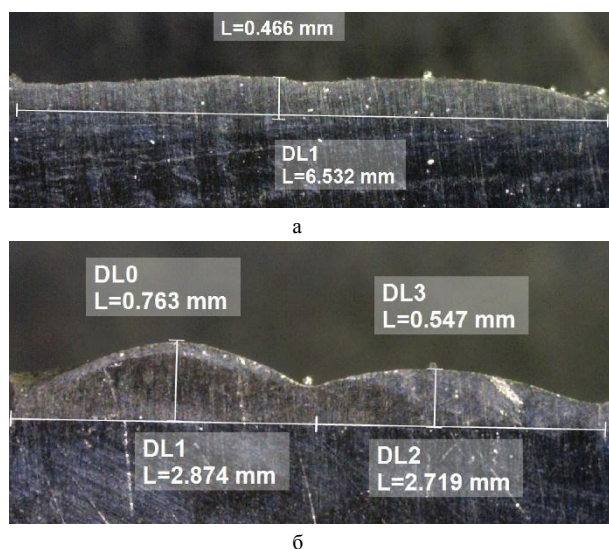


Рис. 1. Микрошлифы зон лазерной наплавки с поперечными колебаниями луча 215 Гц и диаметре луча 2,3 мм:
а – наложение двух дорожек $P = 700$ Вт, $V = 9$ мм/с,
б – левая дорожка $P = 1000$ Вт, $V = 7$ мм/с, правая дорожка $P = 800$ Вт, $V = 7$ мм/с

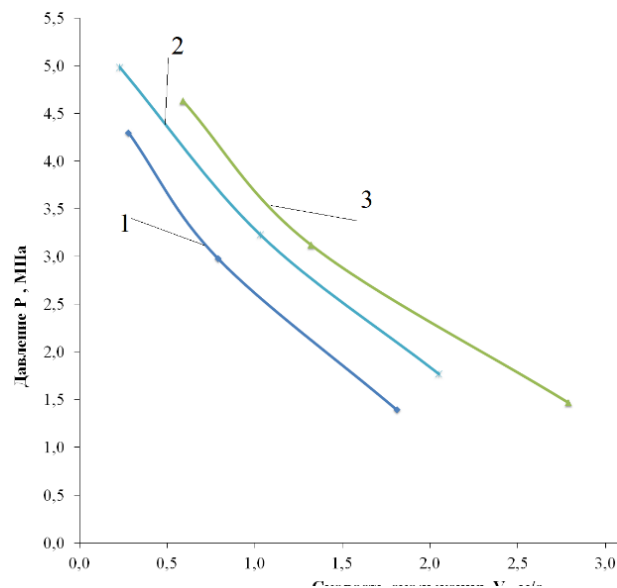


Рис. 2. Зависимость критических давлений от скоростей скольжения: 1 – Fe-Cr-Si-Mn-B+ Ni-Cr-Si-B-Fe, 2 – Fe-Cr-Si-Mn-B+ Ni-Cr-Si-B-Fe + 10% TiC, 3 – Fe-Cr-Si-Mn-B+ Ni-Cr-Si-B-Fe + 5% TiC

Табл. 1. Интенсивность изнашивания покрытий

Наименование материала	Интенсивность Изнашивания образца $J \cdot 10^{-9}$	Интенсивность изнашивания контрообразца $J \cdot 10^{-9}$
Fe-Cr-Si-Mn-B+ Ni-Cr-Si-B-Fe	0,1880	0,1710
Fe-Cr-Si-Mn-B+ Ni-Cr-Si-B-Fe + 10% TiC	0,1120	0,1735
Fe-Cr-Si-Mn-B+ Ni-Cr-Si-B-Fe + 5% TiC	0,0855	0,1346

Анализ результатов испытаний на интенсивность изнашивания покрытий показал, что многокомпонентное покрытие без карбидов уступает покрытию с крупными карбидами в 1,6 раза и с мелкодисперсными карбидами в 2,2 раза. При этом содержание ультрадисперсных карбидов в 2 раза меньше, чем с размером частиц 40-100 мкм. Следует отметить, что интенсивность изнашивания контрообразцов также имеет минимальное значение при работе в паре с многокомпонентным покрытием с ультрадисперсными карбидами. Применение технологии лазерной наплавки с ультрадисперсными карбидами позволит повысить не только износостойкость обработанных деталей, но ответных деталей, работающих с ними в паре трения, а значит увеличить ресурс работы узла трения в целом.

Лазерная наплавка может быть использована при изготовлении деталей почвообрабатывающих машин. При этом наплавленные покрытия работают в основном на абразивный износ, который

начинается сразу с момента эксплуатации. Важно, чтобы ресурс работы таких деталей превышал время сезонных работ для исключения простоев машин и агрегатов. Разработанная технология лазерной наплавки может быть использована при обработке новых деталей и при восстановлении шеек валов, зубчатых передач и других деталей.

Заключение

Разработана технология лазерной наплавки многокомпонентных металлокерамических покрытий с поперечными колебаниями луча позволяющая повысить производительность обработки в 1,4-2,1 раза по сравнению с наплавкой расфокусированным лучом. Износостойкость наплавленных слоев с ультрадисперсными карбидами в 2,2 раза выше, чем покрытий многокомпонентным сплавом без карбидов. Критические скорости скольжения в парах трения до наступления заедания

увеличиваются в 1,69 – 3,0 раза для покрытий с ультрадисперсными карбидами.

- [1] Wen X. et al. Corrosion and tribo-corrosion behaviors of nanolamellar Ni1. 5CrCoFe0. 5Mo0. 1Nbx eutectic high-entropy alloy coatings: The role of dual-phase microstructure //Corrosion Science. – 2022. – Т. 201. – С. 110305.
- [2] Cai Z. et al. Microstructure and corrosion behavior of AlCrTiV-X (X= Cu, Mo, CuMo) high-entropy alloy films in 3.5 wt.% NaCl solution //Surfaces and Interfaces. – 2021. – Т. 27. – С. 101558.
- [3] Deschuyteneer D. et al. Influence of large particle size–up to 1.2 mm–and morphology on wear resistance in NiCrBSi/WC laser cladded composite coatings //Surface and Coatings Technology. – 2017. – Т. 311. – С. 365-373.
- [4] Wei C. et al. Improving Resistance to Crack and Corrosion of Laser-Cladded TiC/Co-based Composite Coatings by Doping Minor CeO2 //Int. J. Electrochem. Sci. – 2022. – Т. 17. – №. 220622. – С. 2.
- [5] Ma Q. et al. Crack-free 60 wt% WC reinforced FeCoNiCr high-entropy alloy composite coating fabricated by laser cladding //Materials Letters. – 2022. – Т. 324. – С. 132667.
- [6] Cai Y. et al. Fracture and wear mechanisms of FeMnCrNiCo+ x (TiC) composite high-entropy alloy cladding layers //Applied surface science. – 2021. – Т. 543. – С. 148794.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА К МАСЛАМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТРЕНИЯ

¹Бирюков В.П. *, ¹Принц А.Н., ²Корноухов А.П.

*E-mail: laser-52@yandex.ru

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

²Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

В работе представлены результаты триботехнических и металлографических исследований пар трения сталь – латунь в присутствии гидравлического масла МГЕ-10А и с добавлением 0,5, 2,0 и 4,0 об. % наноструктурированной присадки Стрибойл. Показано, что введение 0,5 об.% присадки, значительно снижают момент трения от давления, коэффициенты трения скольжения во всем диапазоне скоростей и критические скорости скольжения до заедания. Минимальные значения интенсивности изнашивания получены при содержании присадки 2,0 об.% и она ниже, чем на базовом масле в 3,46 раза, а при 0,5 об.% в 2,66 раза.

Ключевые слова: базовое масло, присадка, момент трения, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF THE ADDITIVE MATERIAL FOR OILS TO IMPROVE THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF FRICTION PAIRS

Biryukov V.P., Prince A.N., Kornoukhov A.P.

The paper presents the results of tribotechnical and metallographic studies of steel–brass friction pairs in the presence of hydraulic oil MGE-10A, and with the addition of 0,5, 2,0 and 4,0 vol. % nanostructured additive Striboil. It is shown that the introduction of 0.5 vol.% of the additive significantly reduces the moment of friction from pressure, sliding friction coefficients over the entire speed range and critical sliding speeds before jamming. The minimum values of the wear intensity were obtained at an additive content of 2,0 vol.% and it is lower than in base oil by 3,46 times, and at 0,5 vol.% by 2,66 times.

Keywords: base oil, additive, friction moment, friction coefficient, wear intensity.

Введение

При работе машины причиной повреждений и потерь энергии является трение, и основным методом их уменьшения является введение смазочных материалов [1]. Важно улучшить свойства смазочного материала, чтобы соответствовать условиям эксплуатации, и это в основном достигается за счет подходящего сочетания базового масла и присадок. Многие опубликованные работы, в которых изучалось включение наночастиц в качестве добавок в смазочные материалы, показывают значительное улучшение в снижении коэффициентов трения и износа [2, 3]. При использовании эфирного базового масла DIOS с добавками 2,5% маслорастворимых наночастиц меди [4], покрытых диалкилдитиофосфатом Cu-DDP и наночастицы NPS Cu диаметром 5-9 нм. Смеси масла DIOS, NPS Cu и Cu-DDP были стабильно диспергированы с помощью ультразвуковой ванны в течение 15 мин. Синергетический эффект между NPS Cu и Cu-DDP проявляется в улучшении трибологических характеристик, повышении эффективности антиокисления и кинематической вязкости чистого масла DIOS.

Образцы для испытаний на машине трения (MTM) изготавливали из стали AISI 52100 с шероховатостью диска и шарика $Ra = 0,01$ мкм, а их диаметры составляли 46 мм и 19,05 мм. Базовым маслом было полиальфаолефиновое масло NEXBASE (ПАО) с вязкостью $24,6$ мм²/с при 40 °С и 4 мм²/с при 100 °С. Диалкилдитиофосфат цинка ZDDP, использовали в качестве добавки AW, и он имел первичную алкильную структуру с чистотой 99%. В качестве второй добавки использовали полисульфид с 40% содержанием серы. Диаметр нанотрубок MoS₂ находится в диапазоне 100-150 нм, а их длина доходила до 3 мкм при толщине стенки 19 нм. MoS₂ обладает превосходной синергией с присадками AW в смешанных условиях трения качения со скольжением. Кривые Штрибека показали, что добавление нанотрубок MoS₂ в смазочные смеси привело к более высокому снижению коэффициента трения при высоких температурах (до 60%) по сравнению с комнатной температурой (до 35%), особенно в режиме граничной смазки.

Цели и задачи исследования

Целями настоящей работы было определение оптимального содержания наноструктурированной добавки к гидравлическому базовому маслу и триботехнических характеристик пары трения сталь – латунь.

Материалы и методы исследований

Для исследований изготавливали плоские образцы из латуни ЛМц58-2 с размерами $12 \times 20 \times 70$ мм и контрообразцы втулки из стали 50ХФА (49-52 HRC). В базовое гидравлическое масло МГЕ 10-А добавляли наноструктурированную присадку Стрибойл в количестве 0,5, 2,0, и 4,0 об.%. Металлографические исследования выполняли на цифровом и инвертированном микроскопах. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3. Триботехнические испытания выполняли по схеме (рис. 1) «широкая сторона плоского образца (ЛМц58-2) – торец контрообразца, стальной втулки». Определение интенсивности изнашивания выполняли после приработки образцов в течение 1 минуты при постоянной скорости скольжения и нагрузке. Продолжительность цикла составляла 5 минут. Определения коэффициентов трения и критического давления до заедания проводили при ступенчатом изменении нагрузки и скорости скольжения.

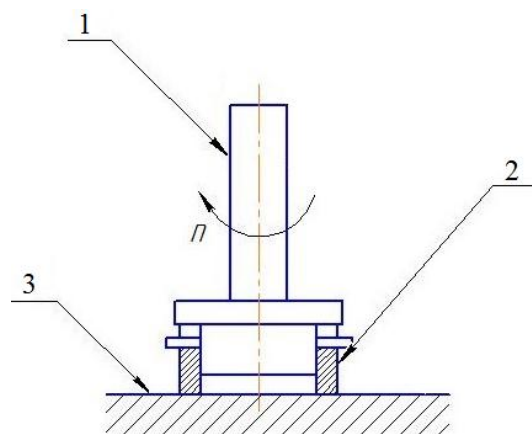


Рис. 1. Схема трения: 1 – оправка, 2 – контрообразец, 3 – плоский образец

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 а, б представлена морфология поверхности трения латуни без присадки (рис. 2, а), и с содержанием присадки 2 об% (рис. 2, б).

На поверхности трения латунного образца без присадки после испытаний наблюдаются достаточно глубокие риски. Следует отметить, что приработка при наличии присадки происходила значительно быстрее и на поверхности не наблюдали дефектов в виде рисков.

На рис. 3 представлены зависимости изменения моментов трения от давления.

Минимальные моменты трения получены при введении в базовое масло 0,5% присадки Стрибойл, немного выше моменты трения при 2% и 4% присадки. Максимальные моменты трения получены при смазке базовым маслом.

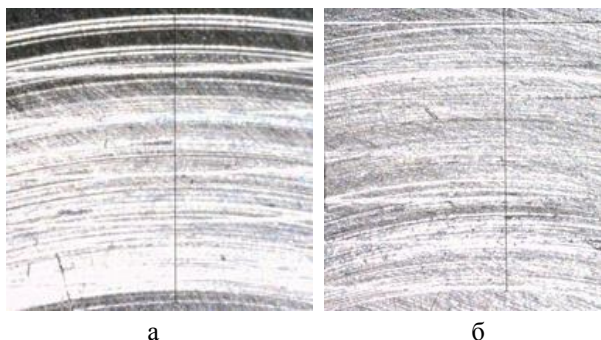


Рис. 2. Морфология поверхности трения латуни ЛМц58-2: а - МГЕ - 10А, б – МГЕ- 10А+2 об% Стрибойл

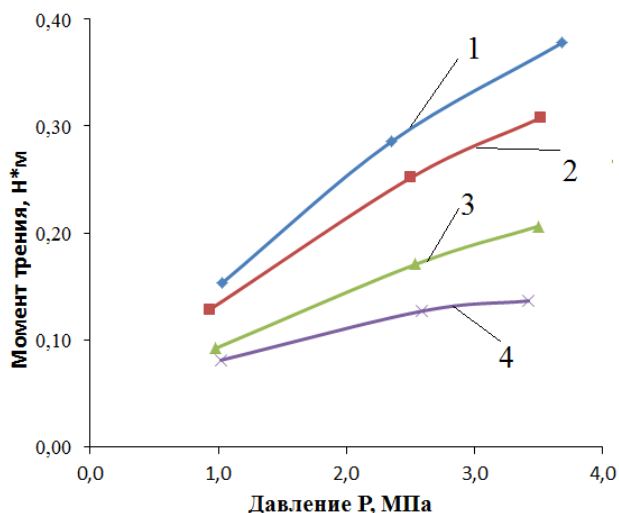


Рис. 3. Зависимости моментов трения от давления: 1 – МГЕ-10А, 2 – МГЕ-10А+4% Стрибойл, 3 – МГЕ-10А+ 2% Стрибойл, 4 – МГЕ-10А+ 0,5% Стрибойл

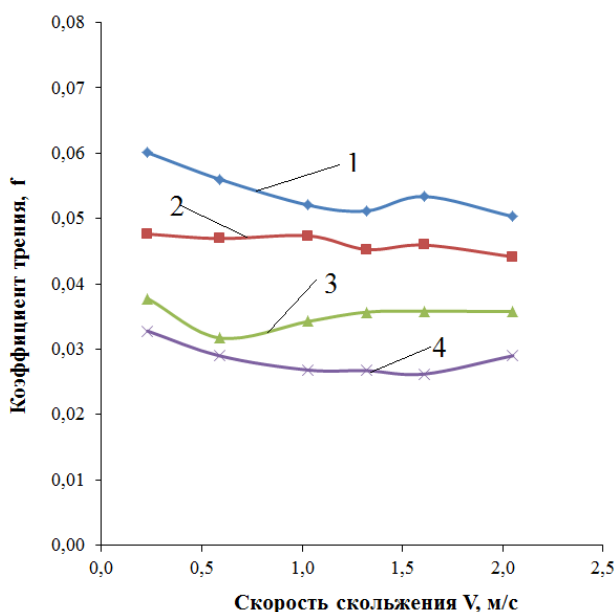


Рис. 4. Изменение коэффициентов трения от скорости скольжения в паре трения латунь ЛМц58-2 – сталь 50ХФА 1 – МГЕ-10А, 2 – МГЕ-10А+4% Стрибойл, 3 – МГЕ-10А+ 2% Стрибойл, 4 – МГЕ-10А+ 0,5% Стрибойл

На рис. 4 показаны закономерности изменения коэффициентов трения от скорости скольжения.

Следует отметить, что минимальный коэффициент трения 0,032 наблюдался при содержании присадки 0,5% и при увеличении скорости скольжения до 1,7 м/с он снижался до 0,028, затем происходило его увеличение до 0,03. При 2% содержании присадки наблюдался минимум коэффициента трения на скорости 0,5 м/с, но его значение 0,032 было выше, чем при 0,5% Стрибойла. Затем коэффициент трения плавно возрастал до 0,035 при скорости скольжения 1,25 м/с, а далее наблюдалось его стабильное значение. При 4% содержании присадки коэффициент трения был еще выше 0,045–0,048 и при увеличении скорости при незначительных отклонениях наблюдалось его снижение до скорости 2 м/с. Максимальный коэффициент трения получен при испытании на базовом масле и его значения изменялись в пределах 0,052–0,06. С увеличением скорости скольжения коэффициент трения также снижался, за исключением скорости 1,5 м/с, где имел место его скачок, возможно связанный с микросхватыванием поверхностей трения. В целом можно положительно оценить влияние присадки на коэффициент трения в зависимости от скорости скольжения, однако для определения критических давлений, при которых происходит схватывание трущихся пар, необходимо было провести дополнительные эксперименты.

На рис. 5 показаны зависимости критических давлений от скорости скольжения. Максимальные критические давления от скорости скольжения получены при введении 0,5% присадки Стрибойл. Ниже этой кривой расположены результаты испытаний с 2 и 4% присадки Стрибойл. Минимальные значения критических давлений от скорости скольжения получены при испытании на базовом масле.

При давлении 7 МПа сопряжение сталь 50ХФА-латунь ЛМц58-2 может работать без заедания до скорости 0,5 м/с с базовым смазочным материалом, а с присадкой Стрибойл 0,5% до скорости 1,5 м/с, т.е практически в три раза выше. При давлении 5 МПа критическая скорость скольжения возрастает в 2,2 раза по сравнению с маслом МГЕ 10-А. При дальнейшем снижении давления критические скорости скольжения сближаются, но все равно кривая с присадками находится выше, чем с базовым маслом.

В таблице 1 приведены средние значения результатов испытаний на интенсивность

изнашивания пары сталь 50ХФА – латунь ЛМц58-2 по трем парам образцов.

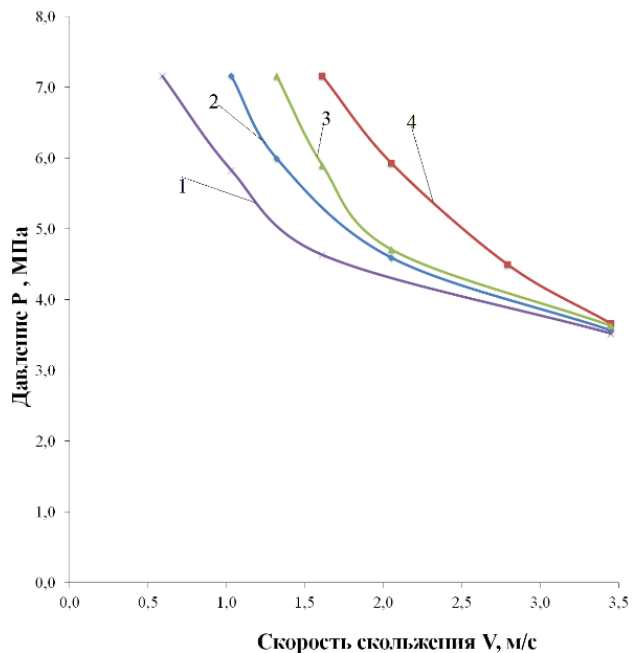


Рис. 5. Зависимость критических давлений от скорости скольжения в паре трения латунь ЛМц58-2 – сталь 50ХФА:
1 – МГЕ-10А, 2 – МГЕ-10А+4% Стрибойл,
3 – МГЕ-10А+ 2% Стрибойл, 4 – МГЕ-10А+ 0,5% Стрибойл

Табл. 1. Средние значения интенсивности изнашивания по трем образцам

Базовое масло и содержание присадки, об%	Интенсивность изнашивания образца латуни ЛМц58-2, $J \cdot 10^{-8}$	Интенсивность изнашивания контробразца стали 50ХФА, $J \cdot 10^{-8}$
МГЕ10-А	2,92	1,165
МГЕ10-А+0,5	1,095	0,829
МГЕ10-А+2,0	0,842	0,688
МГЕ10-А+4	1,179	0,913

Анализ проведенных испытаний на интенсивность изнашивания показал, что в присутствии базового масла она имела максимальное значение $2,98 \cdot 10^{-8}$, в то время как при содержании присадки Стрибойл 0,5, 2,0 и 4,0 об.%, она составляла $1,095$, $0,842$ и $1,179 \cdot 10^{-8}$. Интенсивность изнашивания контробразцов из стали 50ХФА несколько ниже, и наблюдается определенная закономерность, чем меньше изнашивается латунь, тем меньше изнашивается и стальной контробразец. Таким образом, введение присадки однозначно увеличивает ресурс работы узлов трения, что было показано и в более ранних исследованиях, а вот количественная оценка для

этой присадки приведена нами впервые в зависимости от ее процентного содержания в базовом масле МГЕ 10-А. Трудность выбора оптимального процентного содержания заключается в том, что по критерию износостойкости преимущество следует отдать результатам, полученным при 2% ее содержании. Если же нужно решать задачи по снижению коэффициента трения и увеличению задиростойкости узла трения, то предпочтительно применение присадки 0,5% в базовом масле.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы в парах трения гидрообъемных передач (ГОП), гидравлических демпферах подвижного состава, автотранспортной, горнодобывающей и сельскохозяйственной техники, подъемно транспортных машинах, в зубчатых передачах.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при введении присадки Стрибойл в количестве 0,5 об.% в базовое масло МГЕ 10-А значительно уменьшаются коэффициенты трения во всем исследованном диапазоне скоростей скольжения и увеличиваются скорости скольжения до заедания пары трения. Вместе с тем минимальная интенсивность изнашивания получена при содержании присадки 2,0 об.%, однако решение о назначении количественного ее состава должно приниматься из условий при которых работает узел трения, экономии энергетических затрат и повышения ресурса работы механизмов и машин в целом.

- [1] Zhang Z. at al. Effect of Carbon Nanotubes on Friction and Wear of a Piston Ring and Cylinder Liner System under Dry and Lubricated Conditions // Friction. – 2017. – Т. 5. – (2) – С. 147-154.
- [2] Azman N.F. at al. The Anti-Wear and Extreme Pressure Performance of CuO and Graphite Nanoparticles as an Additive in Palm Oil // International Journal of Structural Integrity. – 2019. – Т. 10. – (5) – С. 714-725.
- [3] Li X. at al. Effect of Nanoparticles as Lubricant Additives on Friction and Wear Behavior of Tetrahedral Amorphous Carbon (Ta-C) Coating // Jurnal Tribologi. – 2018. – Т.16. – С. 15-29.
- [4] Guo Z. at al. Interactions of Cu nanoparticles with conventional lubricant additives on tribological performance and some physicochemical properties of an ester base oil //Tribology International. – 2020 – Т.141. – С.105941.
- [5] Tomala A. at al. Synergisms and antagonisms between MoS₂ nanotubes and representative oil additives under various contact conditions // Tribology International. – 2019. – Т.129, – С. 137-150.

ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ В ВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМАХ КАЧЕНИЯ С ЛЮФТОМ

¹Блинов Д.С. *, ²Морозов М.И. **

*E-mail: dmitriyblinov@mail.ru **E-mail: mihailmi@mail.ru

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

²ООО «Экспериментальная Мастерская НаукаСофт», Москва, Россия.

Для развития современного машиностроения, важную роль имеет переход от трения скольжения к трению качения в узлах, шарнирах и механизмах, работающих под нагрузкой. Отсюда, среди винтовых механизмов, перспективными являются роликовинтовые механизмы качения (объекты исследования). Они обладают многими достоинствами, но имеют и недостатки, один из которых – проскальзывание при работе. Статья посвящена изучению причин возникновения проскальзывания с целью снижения его влияния на работу механизма или устранения.

Ключевые слова: роликовинтовой механизм, винт, ролик, двойной ход, проскальзывание.

Введение

Винтовой механизм скольжения имеет только две детали (винт и гайку), которые участвуют в преобразовании вращательного движения в поступательное. Без учета люфтов от зазора между винтом и гайкой, проскальзывания в этом механизме нет. Винт и гайка имеют простую конструкцию и отлаженную технологию изготовления, а сам механизм малые габариты, большой выигрыш в силе, высокую жесткость, но низкий КПД, малый ресурс, ограничения по скорости и другие недостатки [1].

Для преодоления указанных недостатков были разработаны винтовые механизмы качения, в которых между винтом и гайкой устанавливаются промежуточные детали, позволяющие реализовать в механизме в основном трение качения. Сначала были разработаны шариковинтовые механизмы (ШВМ), а затем роликовинтовые механизмы (РВМ), которые превосходят ШВМ по грузоподъемности, жесткости, быстродействию, точности и ресурсу, имея примерно такой же КПД. В настоящее время РВМ являются самыми перспективными механическими преобразователями вращательного движения в поступательное движение. Поэтому разрабатываются различные конструкции и исполнения РВМ для эксплуатации в различных условиях [2]. Чаще всего применяются планетарные

SLIPPAGE IN THE SCREW GEAR WITH BACKLASH

Blinov D.S., Morozov M.I.

For the development of modern mechanical engineering, an important role is played by the transition from sliding friction to rolling friction in nodes, hinges and mechanisms operating under load. Hence, among screw mechanisms, roller screw gears (objects of study) are promising. They have many advantages, but they also have disadvantages, one of which is slippage during operation. The article is devoted to the study of the causes of slippage in order to reduce its impact on the operation of the mechanism or eliminate.

Keywords: roller screw gear, screw, roller, double stroke, slipping.

многопоточные роликовинтовые механизмы (ПРВМ) с осевым люфтом (рис. 1) и беззазорные [2].

ПРВМ с осевым люфтом состоит из винта 1, цельной гайки 2, двух сепараторов 3, в отверстиях которых с возможностью поворота установлены резьбовые ролики 4, на концах которых нарезаны зубчатые венцы «А». С двух сторон в отверстиях гайки 2 закреплены втулки 5 с внутренними зубчатыми венцами, которые зацепляются с венцами «А» роликов, стабилизируя работу ПРВМ.

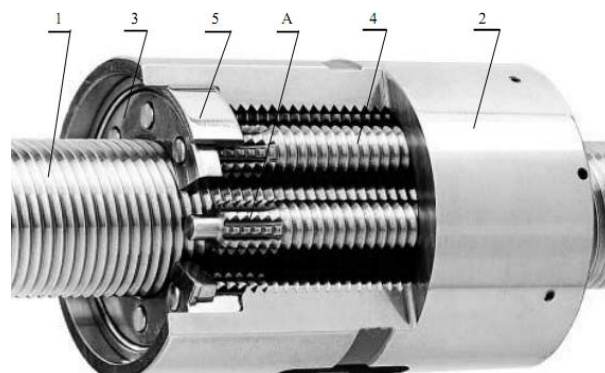


Рис. 1. ПРВМ с осевым люфтом

Резьба винта и гайки правая, специальная, многозаходная, число заходов, обычно, от 4 до 7. Количество силовых потоков равно числу роликов (их обычно бывает от 4 до 14). При этом ПРВМ имеет три замкнутые размерные цепи, отсюда

требуется очень высокая точность изготовления резьбовых поверхностей деталей механизма. Все резьбовые детали закалены до высокой твердости ($\geq 60 \text{ HRC}_s$). Отсюда, самой сложной в изготовлении деталью является гайка, и в мире прослеживается тенденция по разработке более дешевых безгаечных роликвинтовых механизмов (БРВМ) [3].

Объекты исследования

Для изготовления резьбовых деталей ПРВМ нужны специальные дорогостоящие импортные станки, а для изготовления деталей БРВМ можно использовать универсальные станки. Поэтому, учитывая политику импортозамещения, в качестве объектов исследования выбраны БРВМ, которые были разработаны в РФ и запатентованы [4].

В отличие от традиционных ПРВМ в БРВМ отсутствует гайка, а ее функции выполняют другие детали, см. рис. 2.

БРВМ состоит из винта 1, резьбовых роликов 2, корпуса 3 с базовыми элементами «Б», двух крышек 4, соединенных с корпусом с помощью винтов 5 с пружинными шайбами 6. Между корпусом 3 и крышками 4 установлены компенсаторные кольца 7, а на крышках с помощью колец 8 закреплены уплотнения 9. С двух сторон на шейках «В» роликов установлены кольца 10, удерживающие ролики от радиального перемещения. Шары 10 установлены одновременно в сферических гнездах «А» на внутренних торцах крышек и соответствующих сферических гнездах «Г» на торцах роликов и предназначены для передачи осевой силы с роликов на корпус. В рассмотренном БРВМ винт вращается, вовлекая во вращение вокруг своей оси ролики, корпус перемещается вдоль оси винта, а кольца катятся по шейкам роликов.

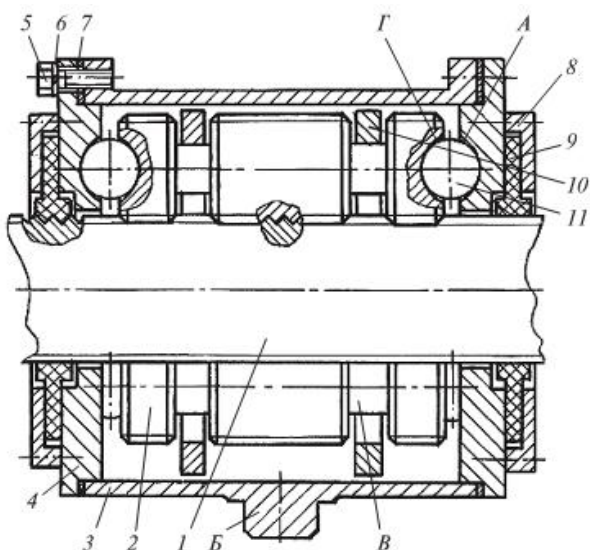


Рис. 2. Безгаечный роликвинтовой механизм

Обзор эксплуатационных параметров РВМ

В обзоре рассматривались ШВМ, ПРВМ и БРВМ, последние имеют большинство основных эксплуатационных параметров на уровне параметров известных ПРВМ, а этот уровень очень высокий [2, 3]. Различные конструкции ПРВМ и БРВМ имеют и различные недостатки, среди которых для всех конструкций присутствует проскальзывание. В работе [2] отмечается, что «... проскальзывание роликов вдоль витков резьбы винта в общем случае нарушает постоянство передаточного отношения». В работе [5] указано, что наличие зубчатого зацепления роликов с гайкой только уменьшает проскальзывание, но не исключает его. В работе [6], исследуя высокоточный гексапод космического применения на базе ШВМ, автор анализирует погрешности перемещения гайки, среди которых отмечает погрешности, возникающие из-за инерционных нагрузок при переключках, то есть из-за проскальзывания. В статье [7] описываются экспериментальные исследования ПРВМ и полученные результаты, при этом установлено, что погрешность передаточного отношения ПРВМ объясняется проскальзыванием. В других работах говорится о непостоянстве передаточного отношения или неточностях перемещения выходного звена винтовых механизмов качения без выявления причин.

Таким образом, явление проскальзывания в винтовых механизмах качения с люфтом приводит к непостоянству передаточного отношения механизма (снижает точность перемещения выходного звена).

Цель работы – определить механизм и причины возникновения проскальзывания, разработать мероприятия по его снижению.

Механизм и причины возникновения проскальзывания в РВМ

Допущение – не учитываются погрешности изготовления деталей РВМ и рассматриваются номинальные положения (координаты) звеньев механизма.

В РВМ входное звено вращается и его положение определяет угловая координата φ , а выходное звено совершает поступательное движение и его положение определяет координата z , при этом эти координаты согласованы уравнением $z = u \cdot \varphi$, где u – номинальное передаточное отношение механизма.

Рассогласование указанного уравнения происходит из-за проскальзывания, при котором меняется величина передаточного отношения. Если в ПРВМ (см. рис. 1) одновременно запретить переносное и относительное движения роликов, то

получится жесткий узел, состоящий из гайки и всех роликов, а винт, скользя по виткам роликов жесткого узла, будут перемещать его. То есть ПРВМ одномоментно превратится в винтовой механизм скольжения со своим передаточным отношением.

Учитывая это явление, при проектировании ПРВМ так назначаются геометрические параметры, чтобы ПРВМ и рассмотренный выше винтовой механизм скольжения имели одинаковое передаточное отношение. Но избежать проскальзывания все равно не удастся, оно возникает по другим причинам, например, при пуске (останове) из-за большой инерционной нагрузки; при случайных пиковых нагрузках и т.д.

Еще одной причиной возникновения проскальзывания в РВМ является их многопоточность. Каждый ролик с винтом имеет в конкретный момент времени свое передаточное отношение, которое незначительно отличается от номинального и постоянно меняется из-за пространственного положения ролика и радиального зазора между винтом и роликом. При работе РВМ эти передаточные отношения усредняются за счет скольжения роликов по винту. Зубчатые зацепления роликов с гайкой снижают проскальзывание, но не исключают его совсем, так как между сопрягаемыми зубьями имеются зазоры.

Проскальзывание снижает точность работы винтового механизма качения, а если погрешность позиционирования выйдет за допустимую границу, то возможен функциональный или параметрический отказ [1].

Установлено [3], что проскальзывание в ПРВМ проявляется меньше, чем в БРВМ. Объясняется это особенностями назначения геометрических параметров в ПРВМ (см. выше) и наличием зубчатых зацеплений между роликами и гайкой.

Отсюда актуальным являются исследования процесса проскальзывания именно в БРВМ. Объективные результаты исследований можно получить только экспериментально.

Экспериментальные исследования БРВМ

Для проведения исследований были разработаны и изготовлены опытный образец электромеханического привода на базе БРВМ и испытательная установка, см. рис. 3.

Испытательная установка состоит из силового блока (см. рис. 4), коммутационного шкафа, компрессора, проводов и управляется от ЭВМ в среде LabVIEW.

Силовой блок состоит из корпуса-рамы 1, закрепленного на ней электромеханического привода 2 на базе БРВМ, датчика силы 3,



Рис. 3. Испытательная установка

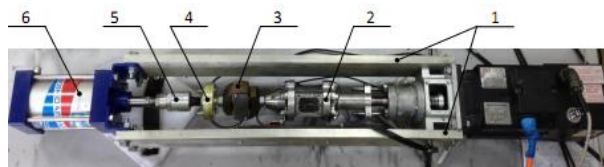


Рис. 4. Силовой блок испытательной установки

соединенного с одной стороны с БРВМ, а с другой стороны через компенсирующие муфты 4 и 5 с пневмоцилиндром 6, являющегося нагружающим устройством. Давление в пневмоцилиндре создает компрессор. Измерения и обработка результатов проводятся посредством ЭВМ в среде LabVIEW. Например, требуемое усилие на штоке обеспечивается путём создания и поддержания заданного уровня давления воздуха в пневмоцилиндре, или проводится измерение температуры в контрольных точках через заданные промежутки времени термодарами.

В результате выполненных экспериментов было установлено, что величина проскальзывания велика, она составляет несколько процентов от величины хода выходного звена (расстояния от начальной точки выходного звена до конечной). Величина проскальзывания зависит от средней частоты вращения входного звена, от величины рабочей осевой силы, действующей на выходное звено, от направления рабочей осевой силы и в меньшей мере от других параметров.

Получен важный вывод - возможно не только отставание выходного звена от номинального положения, но и опережение, если рабочая осевая сила постоянно направлена от элементов крепления БРВМ.

Среди геометрических параметров деталей БРВМ наибольшее влияние на проскальзывание оказывает отклонение от соосности шеек ролика относительно его резьбовой поверхности. На рисунке 5 показан винт, взаимодействующий с роликом, имеющим ось резьбовой поверхности « O_p » и ось шейки « $O_{ш}$ ». При этом e - отклонение от соосности указанных поверхностей.

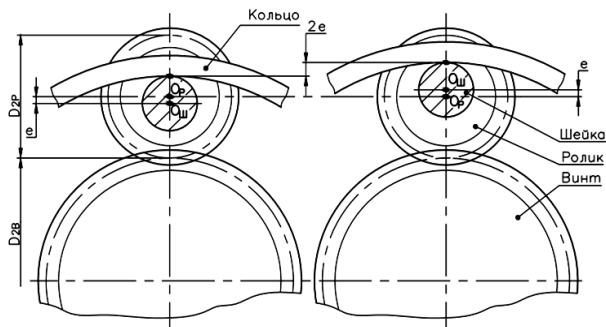


Рис. 5. Два положения на винте ролика с несоосной шейкой

Слева на рис. 5 у ролика ось « O_p » расположена над осью « $O_{ш}$ », а на этом же рисунке справа ось ролика « O_p » расположена под осью « $O_{ш}$ ». При этом радиус от оси винта до точки контакта отверстия кольца с шейкой ролика за пол оборота увеличится на $2e$. Если у противоположно расположенного в БРВМ ролика аналогичный радиус тоже увеличится, то возможно одномоментное заклинивание роликов, что приведет к проскальзыванию.

Мероприятия по снижению проскальзывания

а) В РВМ, для управления, используют обратную связь по углу поворота входного звена с помощью энкодера (просто и дешево).

Для снижения проскальзывания в ПРВМ, как уже отмечалось, используют зубчатые зацепления роликов с гайкой. В патенте [9] предлагается связать дополнительно ролики зубчатыми зацеплениями с винтом.

Для снижения проскальзывания в БРВМ можно использовать зубчатые зацепления роликов с корпусом, установив ролики с возможностью планетарного движение. Это снизит нагрузочную способность БРВМ и введет жесткие соотношения на размеры деталей механизма.

Для снижения проскальзывания в ПРВМ и в БРВМ можно использовать периодические корректировки соответствия координат входного и выходного звена - переход звеньев механизма в контрольной точке в нулевое положение. Это способ применяли для сварочных роботов, в которых использовали ПРВМ, на автозаводах.

б) Для повышения точности перемещения, в РВМ используют обратную связь по линейной координате выходного звена. В этом случае применяют различные датчики линейных перемещений (аналоговые, цифровые, оптические и т.д.), которые сложнее и дороже энкодера, а также имеют большие габариты.

В экспериментальной установке (см. выше) использовался линейный магнитный датчик LM13IC2D0AA50F00 (точность измерения 0,002 мм), установленный на выходном звене

(штоке). Он измерял фактическое положение штока в режиме реального времени и использовался, как главная обратная связь в системе управления БРВМ, что позволило свести проскальзывание практически к нулю.

Заключение

1. Одним из основных недостатков винтовых механизмов качения является проскальзывание, из-за которого происходит рассогласование заданных и фактических координат. Это приводит к снижению точности работы механизма.

2. Роликовинтовые механизмы имеют различные конструкции. Для изготовления деталей ПРВМ требуются зарубежные специальные дорогостоящие станки, а для изготовления деталей БРВМ можно использовать универсальные станки, что выгодно в условиях импортозамещения. При этом в ПРВМ проскальзывание проявляется меньше, чем в БРВМ.

3. В электромеханическом приводе с БРВМ необходимо предусматривать контроль с помощью главной обратной связи с использованием датчиков линейного перемещения, конструкция которого зависит от требуемой точности перемещения выходного звена БРВМ и конструкции его корпусных деталей.

- [1] Детали машин: учебник для вузов под ред. О.А. Ряховского, 4-е изд. перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. - 465 с.
- [2] Козырев В.В. Конструкции роликовинтовых передач и методика их проектирования. Учеб. пособие. Владимир. гос. ун-т. Владимир, 2004. - 102 с.
- [3] Блинов Д.С. Винтовые передачи линейных приводов: учебное пособие. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2021. - 199 с.
- [4] Блинов Д.С., Лаптев И.А., Фролов А.В. Устройство для преобразования вращательного движения в поступательное. / Патент РФ № 2463500. Б.И. 2012. № 28.
- [5] Янгулов В.С. Проектирование передач с линейными перемещениями выходного звена: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011. - 169 с.
- [6] Слободзян Н.С. Прецизионное управление линейным приводом механизма с параллельной структурой космического применения: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2021. - 166 с.
- [7] Железко К.В., Полянцева Д.В. Разработка исполнительного механизма электромеханического привода на основе роликовинтовой передачи. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса: история, реальность, инновации». НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2017. - 303 с.
- [8] Блинов Д.С., Морозов М.И. Экспериментальные исследования безгаечной роликовинтовой передачи (Результаты исследований). Справочник. Инженерный журнал. - 2018. - № 4. - С. 18-27.
- [9] Furukubo Taro, Takeshi Ishida Swaging hold method, swaging hold structure, swaging roller, swaging machine, and swaging hold workpiece / Patent US 2010/0071641

ТВЕРДЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ-ОРИЕНТАНТЫ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ

Большаков А.Н.

E-mail: bolshakov.and@gmail.com

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Исследовано влияние состава углеродных покрытий-ориентантов на способность повышения антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов при трении в режиме граничной смазки. Показано, что антифрикционные свойства смазочных сред, содержащих серу, значительно повышаются при трении стали по покрытиям, легированным вольфрамом и молибденом.

Ключевые слова: углеродные покрытия-ориентанты, смазочная способность, граничная смазка, легирование карбидообразующими элементами, антифрикционные и противоизносные свойства.

Введение

Одним из применяемых решений для повышения энергоэффективности узлов и агрегатов машин является концепция – малый вес при высокой выходной мощности и надежности. Это приводит к увеличению удельных нагрузок и температур функционирования трибосопряжений, значительная часть которых работает в условиях смазывания. Наиболее жестким режимом смазки является граничный режим, который сопровождается изнашиванием контактирующих тел и большими энергетическими потерями, чем при жидкостной смазке.

В этом режиме поверхности не разделены сплошным слоем смазочного материала, а непосредственный металлический контакт трущихся поверхностей минимизируется за счет образования тончайших граничных слоёв. При ужесточении работы узла целостность этих слоёв нарушается, возрастает доля участков непосредственного металлического контакта, что приводит к значительному увеличению коэффициента трения и ускорению процесса изнашивания.

Поэтому, для повышения эффективности процесса граничной смазки материалы трущихся тел должны, с одной стороны, обеспечивать взаимодействие с компонентами смазочного материала, образуя прочные граничные слои, минимизирующие участки металлического контакта, а с другой – обеспечивать низкое трение и

HARD CARBON COATINGS-ORIENTANTS AS A METHOD FOR CONTROLLING THE LUBRICATION OF BOUNDARY LAYERS

Bolshakov A.N.

The effect of the composition of carbon coatings-orientants on the ability to increase antifriction and antiwear properties of lubricants during friction in the boundary lubrication conditions has been studied. It is shown that the antifriction properties of sulfur containing lubricants increase significantly when steel rubs against tungsten and molybdenum doped coatings.

Keywords: carbon coatings-orientants, lubricity, boundary lubrication, carbide-forming elements doping, antifriction and antiwear properties.

малый износ при ужесточении режима работы, когда целостность граничного слоя нарушается и доля непосредственного контакта поверхностей возрастает.

Как показали многочисленные исследования, роль такого материала могут выполнять покрытия на основе углерода, в частности, перспективные алмазоподобные покрытия (DLC - покрытия) [1], и покрытия на основе линейно-цепочечного двумерно упорядоченного углерода, обладающих свойством ориентанта [2]. Значительное влияние на трибологические характеристики этих покрытий оказывает наличие и природа легирующих элементов, а также тип смазочной среды (поверхностно- или химически- активная) [3]. Ранее было показано, что легирование азотом покрытий-ориентантов повышает их трибологические свойства, а серебром, наоборот, ухудшает [4].

Целью работы является оценка возможности повышения смазочной способности ряда модельных смазочных сред, при трении стали по покрытиям-ориентантам, путем их легирования карбидообразующими элементами вольфрамом, молибденом и кремнием.

Материалы и методы

Покрытия-ориентанты наносили на цилиндрическую поверхность образцов роликов 8x8 мм (100Cr6) и на плоские образцы-пластины (ШХ-15) вакуумным ионно-плазменным методом по специально разработанной методике, путем

распыления графитовой мишени и одновременным стимулированием растущего покрытия ионами аргона. Легирование *Si*, *W*, *Mo* осуществляли распылением соответствующих мишеней в процессе роста пленки. Для повышения адгезии к подложке перед нанесением покрытия, напыляли подслоя кремния толщиной 0,05 мкм. Толщины нанесенного покрытия составляли $2,0 \pm 0,5$ мкм.

Измерение нанотвердости и оценка адгезии производилась с помощью измерительного комплекса CSM Micro Indentation Tester МНТХ. Глубина вдавливания алмазной пирамиды (трехгранная пирамида Берковича) составляла порядка 200 нм.

Исследования антифрикционных и противоизносных свойств проводили на лабораторных машинах трения, реализующих три схемы испытаний (рис. 1): КТ-2 (рис. 1а), ВП-1 (рис. 1б) (разработаны в ИМАШ РАН) и вибротрибометре UMT-3МТ (рис. 1в) (производство компании CETR). При испытаниях на машине КТ-2 ролики с нанесенным покрытием устанавливались в специальную оправку симметрично относительно шпинделя с закрепленным верхним образцом – шаром Ø12,7 мм (ШХ-15). Частота вращения шпинделя составляла 1 мин^{-1} , осевая нагрузка 100 Н, время каждого испытания 60 мин. На машине ВП-1 и вибротрибометре UMT3-МТ в качестве ответных образцов так же применялись стандартные ролики 8x8 мм (100Cr6) и шары Ø12,7 мм (ШХ-15), соответственно. На установке ВП-1 частота составляла 1 Гц, диапазон нагрузок 12,5-50 Н, длина хода 30 мм. Испытания на стандартном вибротрибометре UMT3-МТ проводили по ASTM D6425 в интервале нагрузок 4-50 Н, частоте осцилляций 1-50 Гц.

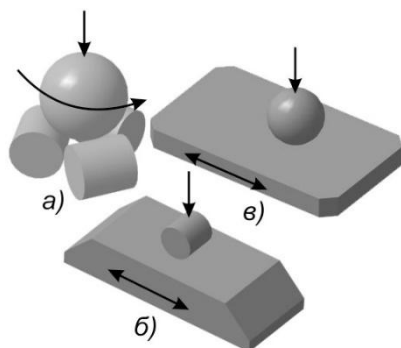


Рис. 1. Схемы испытаний

В качестве характерных инертных смазочных сред для данного исследования были выбраны: синтетическое полиальфаолефиновое масло ПАО-4; ациклический углеводород

н-тетрадекан ($n\text{-C}_{14}\text{H}_{30}$). В качестве поверхностно-активной среды использовали растворы с присадкой до 1% (масс) олеиновой кислоты, а в качестве химически активной серосодержащей среды растворы с присадкой до 2% диалкилдитиофосфата цинка (присадка ДФ-11).

Результаты и обсуждение

Результаты исследования микромеханических характеристик полученных покрытий показывают, что легирование *Si* практически не влияет на нанотвердость, а при легировании *Mo* и *W* она повышается до 12,2 и 15,0 ГПа, соответственно. При измерении адгезии методом склерометрии наблюдалось отсутствие отслоения покрытия на нагрузках менее 20 мН, что свидетельствует о достаточной адгезии покрытий к подложке.

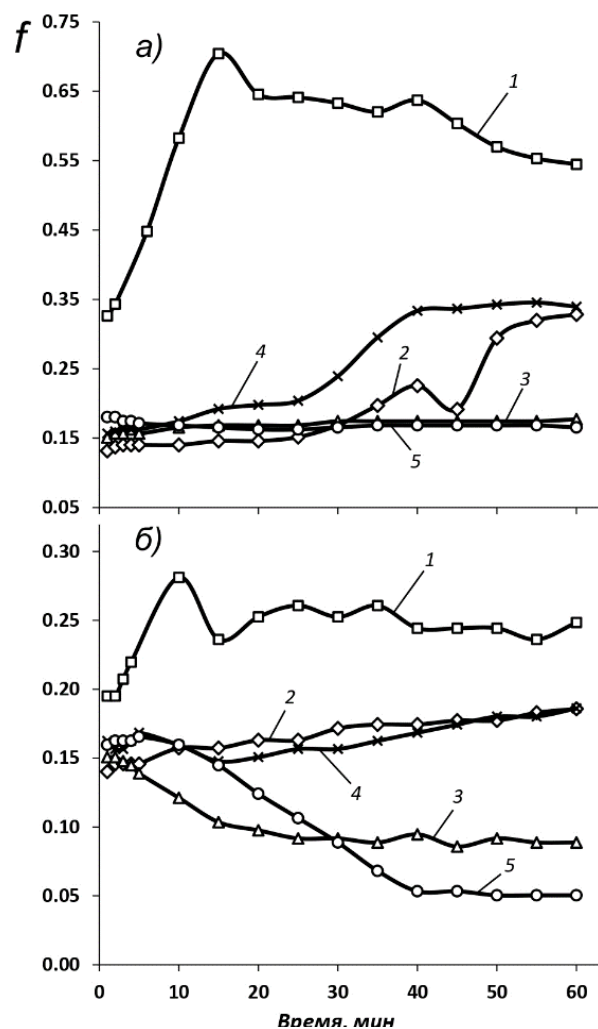


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний на машине КТ-2 со смазкой маслом ПАО-4 (а) и ПАО-4+2% присадки ДФ-11 (б): 1 – трение стали по стали; 2 – трение стали по углеродному покрытию-ориентанту; 3 – трение стали по покрытию-ориентанту, легированному вольфрамом; 4 – трение стали по покрытию-ориентанту, легированному кремнием; 5 – трение стали по покрытию-ориентанту, легированному молибденом

При испытаниях на машине КТ-2 все сравниваемые покрытия заметно снижают коэффициент трения в инактивной среде ПАО-4 (рис. 2а). Рост коэффициента трения в середине испытаний для нелегированного покрытия и покрытия легированного Si скорее всего связан с началом их разрушения. При добавлении 1% олеиновой кислоты к ПАО-4 коэффициент трения стали по стали заметно снижается, а при трении стали по покрытиям остается практически на том же уровне что и при трении в инактивной среде.

При испытаниях в серосодержащей среде (ПАО-4+2%ДФ-11) коэффициент трения в начале испытаний практически такой же, как и в поверхностно-активной среде, однако в дальнейшем, для покрытий легированных W и Mo коэффициент трения начинает в ходе испытаний заметно снижаться и составлял в конце испытаний 0,09 и 0,05, соответственно (рис. 2б). Этот эффект, вероятнее всего, связан с разложением присадки и взаимодействии с W и Mo, содержащихся в покрытиях с последующим образованием дисульфидов вольфрама и молибдена.

При трении стальных деталей по деталям с твердым углеродным покрытием надежность и ресурсосбережение при функционировании трибо-сопряжения зависит не только от износостойкости детали с покрытием, но и от износостойкости ответных деталей. С этой целью при испытаниях по ASTM D 6425 на вибротрибометре, проводилось профилографирование и измерение пятен износа изнашивающих образцов – шаров, а также расчет объемного износа.

Табл. 1. Износы шаров и пластин (стальных и с покрытием-ориентантом, легированным вольфрамом) в среде тетрадекана с присадками олеиновой кислоты (ОК) и диалкилдитиофосфата цинка (ДФ-11) при испытании на вибротрибометре УМТ-ЗМТ

Пара трения	Смазочный материал	Износ шара, мкм ³	Износ пластины, мкм ³	Диаметр пятна износа, мкм
сталь – сталь	тетрадекан	737	320	0,570
	тетрадекан+0,5% ОК	21	14	0,312
	тетрадекан+0,5% ДФ-11	16	18	0,349
сталь – покрытие	тетрадекан	19	18	0,380
	тетрадекан+0,5% ОК	11	7	0,293
	тетрадекан+0,5% ДФ-11	16	9	0,286

Табл. 2. Результаты испытаний стальных образцов с покрытием, легированным вольфрамом и без него в среде синтетического масла ПАО-4 на установке ВП-1

Пара трения	Нагрузка, Н	Износ, мкм	Коэффициент трения*
сталь - сталь	12,5	4,00	0,21
	25	5,00	0,20
	37,5	5,00	0,19
	50	7,00	0,17
сталь - покрытие	12,5	0,10	0,13
	25	0,10	0,14
	37,5	0,12	0,13
	50	0,17	0,13

* Значения коэффициентов трения в конце испытаний.

Добавление присадок в базовую жидкость в количестве 0,5% масс. Приводит к уменьшению износа шаров как при трении по стальной пластине, так и по пластине с покрытием (при данной концентрации присадок больший эффект продемонстрировала олеиновая кислота). Установлено, что противоизносный эффект от добавления присадок при трении стальных образцов практически равен эффекту от нанесения покрытия-ориентанта (Табл. 1). Объемный износ шара при трении стали по стали в среде н-тетрадекан+0,5% масс. олеиновой кислоты и н-тетрадекан+0,5% ДФ-11 составлял 0,021 и 0,016 мкм³ соответственно, тогда как три трении стали по покрытию в базовом н-тетрадекане составлял 0,019 мкм³.

Учитывая то, что на машине трения ВП-1 реализуется начальный линейный контакт образцов и величина хода составляет 30 мм, данную схему испытаний можно рассматривать как моделирующую кинематику цилиндра-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания, в которых применение углеродных покрытий оценивается как перспективное [5]. Испытания по этой схеме покрытия-ориентанта, легированного W, продемонстрировали, что коэффициент трения и износ пластины пары «сталь-покрытие» заметно снижается при всех исследуемых нагрузках. В табл. 2 приведены значения коэффициентов трения, а также линейный износ пластин с нанесенным покрытием.

Заключение

Молибден и вольфрам в качестве легирующих элементов покрытий-ориентантов повышают их нанотвердость и антифрикционные свойства при трении по стали в инактивной смазочной среде. В среде, содержащей поверхностно-активную присадку

– олеиновую кислоту, заметного эффекта от легирования не наблюдалось.

В серосодержащей среде коэффициенты трения стали по покрытиям-ориентантам, легированным соответственно вольфрамом и молибденом, заметно снижаются, что может быть связано с образованием в трибологическом контакте дисульфидов вольфрама и молибдена.

Противоизносный эффект нанесения покрытия-ориентанта при трении по стали в инактивной смазочной среде практически соответствует эффекту от добавления поверхностно-активных и химически-активных присадок при трении пары «сталь-сталь». Причем происходит уменьшение износа, как пластины с покрытием, так и более мягкого контртела (шара).

- [1] Tribology of Diamond-like Films. Fundamental and applications / Ad. C. Done and A. Erdemir. – NY: Springer Science, 2008. – 662 p.
- [2] Левченко В.А., Матвеев В.Н., Дроздов Ю.Н. и др. Антифрикционное покрытие. Патент РФ №2230238, МКИ 7 F 16 C 33/04, Опубл. 10.06.2004, Бюл. №16.
- [3] Buyanovskii I.A., Samusenko V.D., Bol'shakov A.N., Levchenko V.A. Doping diamond-like carbon coatings on rubbing parts as a method for improving antifriction properties of lubricants // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. Т. 50. № 6. С. 516-523.
- [4] Буяновский И.А., Игнатъева З.В., Левченко В.А., Матвеев В.Н. Роль углеродных покрытий-ориентантов в оптимизации смазочной способности граничных слоев // Трение и износ. – 2008. Т. 29. № 4. С. 375-381.
- [5] A. Mallik (Ed.) Engineering Applications of Diamond. London, United Kingdom, IntechOpen, 2021 [Online]. Available from: <https://www.intechopen.com/books/10257> DOI: 10.5772/intechopen.91098

О ПОНЯТИИ УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТРИБОСИСТЕМ

Бородай А.В., Скринников Е.В.

*E-mail: borodai11@yandex.ru

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
г. Новочеркасск, Россия.

Рассматриваются вопросы иерархии естественных систем и трибосистемы в качестве систем высшего уровня. Предложено принимать величину трибопотенциала, приобретаемого третьим телом в процессе фрикционного взаимодействия, в качестве основного показателя уровня организации системы.

Ключевые слова: поверхностные пленки, поверхностные силы, сцепление тел, трибопотенциал, подвод энергии среды.

Введение

Известно, что механическое движение принято считать низшим в ряду различных форм движения [1]. Указанное относится именно к механическому движению, абстрактному процессу, при котором взаимодействие тела со средой и с другими системами принимается упрощенным или отсутствующим. Если же рассматривать всю совокупность процессов, сопровождающих макродвижение, в особенности контактное взаимодействие, то оказывается, что высшим в иерархии оказывается как раз макродвижение как комплекс движения и трения тел. Решение вопросов иерархии трибосистем должно являться фактором обеспечения высокоэффективного макродвижения и технического проектирования.

ON THE NOTION OF ORGANIZATION LEVEL OF TRIBOSYSTEMS

Borodai A.V., Skrinnikov E.V.

The hierarchy of the natural systems and tribosystems as top-level systems are considered. The conception of third body tribopotential attained in friction process as main parameter of level of system organization is presented.

Keywords: surface films, cohesion forces, cohesion effect, tribopotential, power supply to system.

Целью исследования является установление общих принципов иерархии трибосистем и выявление параметров, определяющих уровень их организации.

Метод исследования. Построение логико-геометрических моделей трибосистем для различных режимов трения и их исследование.

Результаты. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, основу строения и кинетики низшей, канонической трибосистемы составляет каноническая (адгезионная) фрикционная связь. Ее элементами являются: тело I, контртело II, суммарные вихри a, b, c ; третье тело III (излучатель волнового трибоимпульса J – важнейший элемент системы), а также активная p и пассивная r стержневые ветви, представляющие собой

некоторые вихревые цепи. Возникновение и структура цепей обусловлены универсальным вихревым строением и кинетикой естественных сред, тел и физических объектов (среда Максвелла). Присутствие ветви p вызывает действие тангенциальной движущей силы F_a , а ветви r – силы трения F_t , препятствующей движению тел [2]. Одними из основных эффектов действия связей являются продольное сжатие ветвей, деформация и перемещение центров масс слоев и взаимодействующих тел Δ_h . Процесс деформаций происходит в полях потенциальных сил F_n и адгезионных сил F_{ad} нормально поверхности, обеспечивая присутствие соответствующих составляющих суммарного потенциала системы (трибопотенциала φ и φ_Σ)

$$\varphi_\Sigma(\varphi) = (F_{ad} + F_n) \Delta_h / m_j,$$

где m_j – масса носителя трибоимпульса.

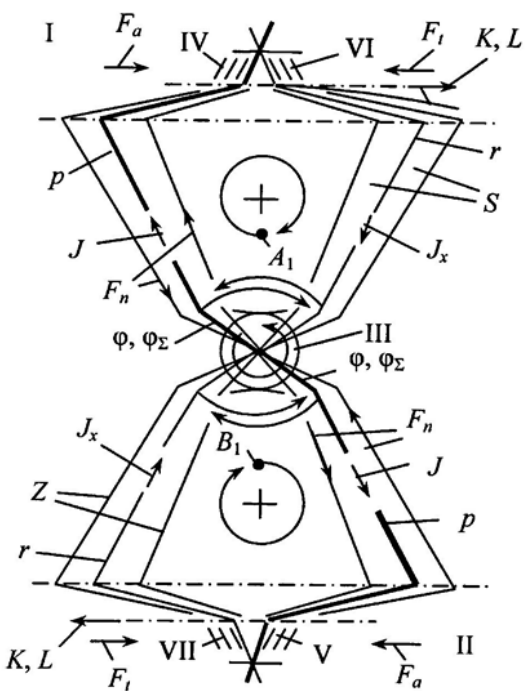


Рис. 1. Схема строения и функционирования адгезионной фрикционной связи

Активная и пассивная ветви связи имеют s -образную конфигурацию, симметричны относительно вертикальной оси и располагаются в смежных параллельных плоскостях, ориентированных нормально поверхности трения в направлении возможного движения взаимодействующих тел. Ветвь p является падающей, а ветвь r – отраженной полуволной, составляющими в сумме замкнутую (стоячую) поперечную волну в поверхностном слое – физическую основу процесса взаимодействий [2]. Стержневые системы образуют противодействующие друг другу пары ветвей, являющихся проводниками излучаемого J и

отраженного потоков J_x носителей волнового импульса (количество движения частиц, рис. 2). Ветви связи одновременно являются проводниками потоков массопереноса (вторичных потоков) вследствие наличия разреженных скин-слоев S , образуемых Z -пленками, окружающими стержни. Это потоки J''_x , генерируемые подслоем тел и распространяющиеся в направлении третьего тела, а также вторичные потоки продуктов трибодеструкции J''_l , создающиеся третьим телом и распространяющиеся в направлении подслоя тел.

Соответственно структура связи характеризуется наличием зон подвода ресурса (энергии и массы) среды в систему (зоны IV и V) и зон поглощения потоков продуктов деструкции подслоем и окружающей средой (зоны VI и VII).

Поступательное перемещение третьего тела и в целом фрикционной связи происходит в веществе поверхностного слоя со скоростью

$$V_3 = (V_t + V_c)/2,$$

где V_t , V_c – соответственно скорости тела и контртела. При этом тело, контртело и третье тело образуют соответственно количества движения (потоки) J_t , J_c и J_3 , из которых важнейшим является поток J_3 .

Связь генерирует тонкие поверхностные K , L -пленки, обеспечивающие возможность процесса образования вихревых (стержневых) складок.

Схема начальной фазы процесса (предварительного смещения и страгивания) представлена на рис. 2. Из схемы следует, что активная ветвь p , развивающая движущую силу F_a , а также действие внешней силы F , преодолевая силу трения, оказываемую пассивной ветвью, осуществляют весьма малые относительные тангенциальные перемещения тел, в процессе которых плоскости расположения связи ориентируются в направлении действия сил F и F_a . Одновременно происходит дополнительное продольное сжатие пассивной ветви. При этом участки пассивной и активной ветвей совершают упругие угловые перемещения (показано дугowymi стрелками на рис. 2, а). Активная и пассивная ветви в указанной фазе процесса находятся в состоянии сцепления с подслоем тел и свободное тангенциальное перемещение тел в этом состоянии невозможно. Основные перемещения в системе – нормальные. Данный процесс формирует вихревые складки d в пассивной ветви вблизи подслоя тел, содержащих в себе основную энергию и потенциал системы (рис. 2, б; 3, а). Указанное сопровождается образованием зон интенсивного разрежения между складками и подслоем и упругими деформациями кручения

третьего тела вследствие поворота связанных с ним стержневых участков 1_r пассивных ветвей. Одно временно со стороны третьего тела действует возрастающее тянущее усилие F_t на образующиеся складки, стремящееся оторвать концы пассивной ветви и складки d от подслоя тел и переместить их в зону расположения третьего тела (рис. 2, б).

Когда силы F и F_a достигают предельных значений, возникает режим излучения потоков J вещества и энергии складок в разреженное пространство в направлении подслоя (рис. 3, б).

При встрече потока J с плотными слоями подслоя возникают тепловые вспышки 1 и 2 (рис. 3, б), захват энергии подслоя и далее – образование потока подводимой энергии среды в систему (отраженный поток J_x , рис.3, в).

Если величина сил F и F_a недостаточна для страгивания тел, поток J_x возвращается обратно в зону излучения и подводимая энергия и масса

потоков сосредоточивается в зонах складок d' и далее вновь излучается в направлении подслоя вдоль оси стержней пассивной ветви. В процессе излучения потока происходит превращение подведенной энергии в энергию поворота пассивных стержней и действие новых движущих сил F_a на тела, уже в направлении, противоположном силам F (рис. 3, з). Пассивная ветвь становится активной и ее действие вызывает малые перемещения тел в направлении сил F_a , вследствие чего прежняя активная ветвь становится пассивной.

Далее в пассивной ветви, подобно начальному состоянию (рис. 3, а), происходит образование складок d вблизи подслоя и протекание процесса аналогично предыдущему с учетом перемены знака сил F_a (рис. 3, д) и переход системы в состояние, аналогичное исходному, но с противоположным знаком потенциала и осуществляется многократное воспроизводство цикла взаимодействий.

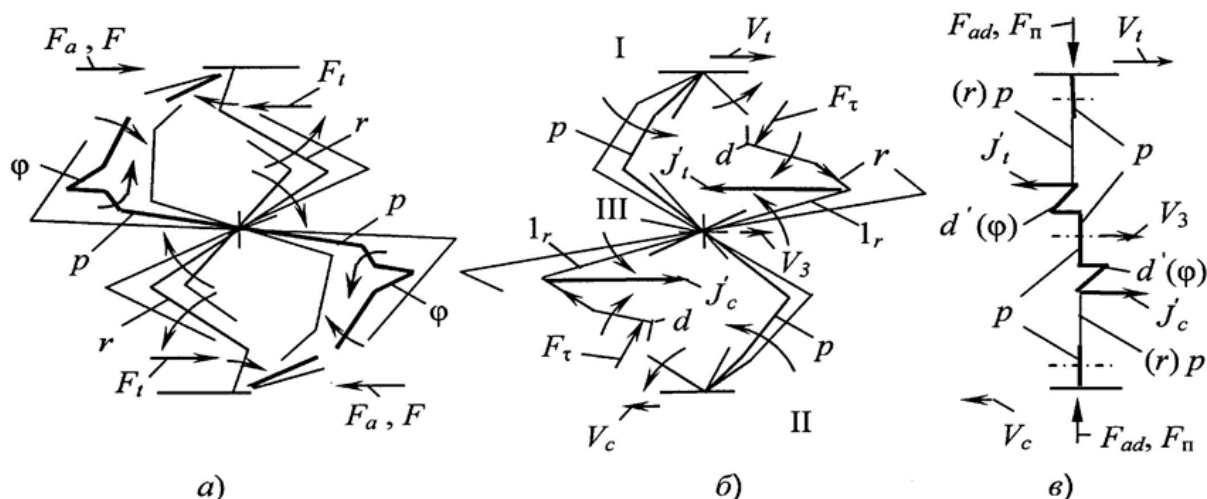


Рис. 2. Схема процесса предварительного смещения (а) и страгивания (б, в); система контактных вихрей не показана

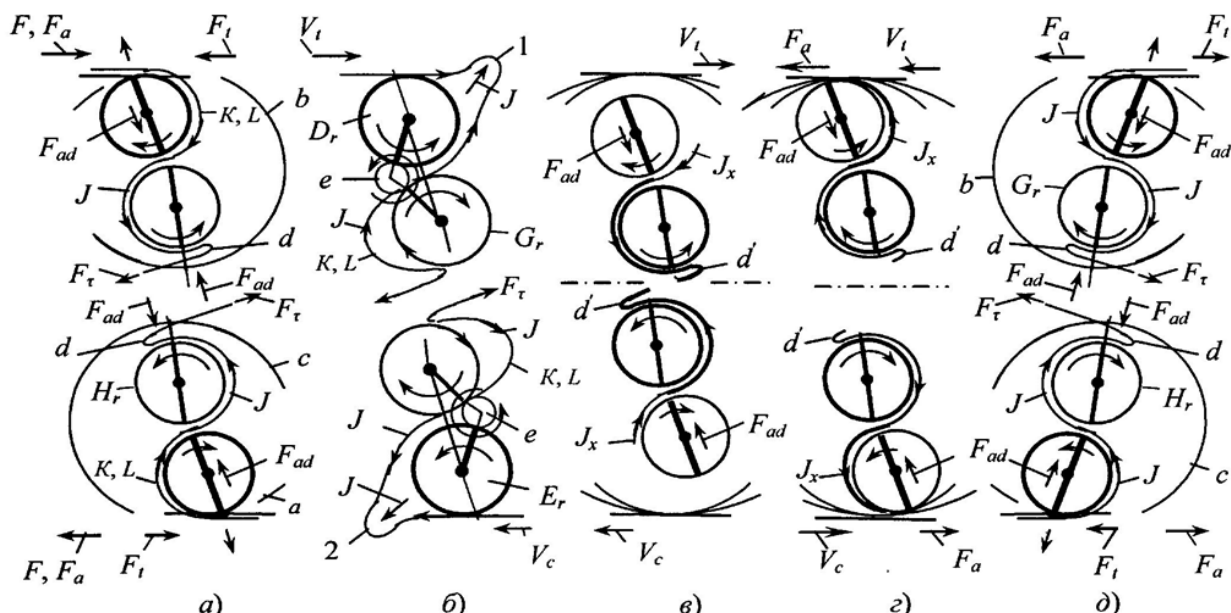


Рис. 3. Схема реализации основных фаз процесса захвата и подвода энергии среды в режиме неподвижного контакта e, D_r, E_r, G_r, H_r – элементы вихревой структуры связи

Указанный процесс представляет собой процесс неподвижного, статического контактирования тел, при котором происходит накопление подводимой энергии и массы в неподвижных зонах складок d' (фреттинг-процесс), характеризующийся повышенной внутренней энергией упруго-пластического поглощения, сосредоточенный вблизи подслоя тел.

При действии на тела сил F и F_a , достаточных для осуществления страгивания, происходит быстрое увеличение расстояния между телами и третьим телом, расщепление тел и отрыв пассивных ветвей от подслоя. Процесс характеризуется интенсивным изменением направления поворота стержня 1, пассивной ветви, освобождением энергии упругих деформаций кручения третьего тела и возникновением присоединенных потоков J_t и J_c , направленных противоположно движению соответствующих тел. Вблизи подслоя каждого из них возникает присоединенный поток (см. рис. 2, б). При этом происходит интенсивное сведение активной и пассивной ветвей при обеспечении сцепления активной ветви с подслоем. Состояние полного сведения ветвей и перемещения складки d' в зону расположения третьего тела (рис. 2, в) завершает переходное состояние системе и является начальным состоянием 1' непрерывного стационарного движения тел (рис. 4). Переход от предварительного смещения к страгиванию, осуществляющийся скачком и являющийся одним

из элементов общего процесса повышения уровня организации системы, обеспечивает возможность непрерывного однонаправленного действия сил F_a и, соответственно, однонаправленного относительного тангенциального перемещения тел.

Наиболее эффективным режимом действия движущих сил является режим функционирования организованной фрикционной связи и трибосистемы, при котором, вследствие достижения повышенного уровня энергии в полях сил, нормальных поверхности, основная роль полей сил переходит к полям сил тяготения и нормальных упругих сил F_n (режимы скачков и полета, средняя часть рис. 5), при которых преобразование энергии, подведенной в систему, и действие движущих сил происходит с максимальной интенсивностью и эффектом. Соответственно, при этом все большую роль приобретает составляющая трибопотенциала $\varphi_n = F_n \Delta_h / m_j$, что обеспечивается скачкообразным переходом от канонического, адгезионного режима к организованному, при котором роль третьего тела играет масса одного из взаимодействующих тел, и осуществляется гиперцикл процессов.

Очевидно, что решение задач повышения уровня организации трибосистем и эффективности движения должно осуществляться путем дальнейшего возрастания значений трибопотенциала посредством увеличения напряженности полей сил, нормальных поверхности.

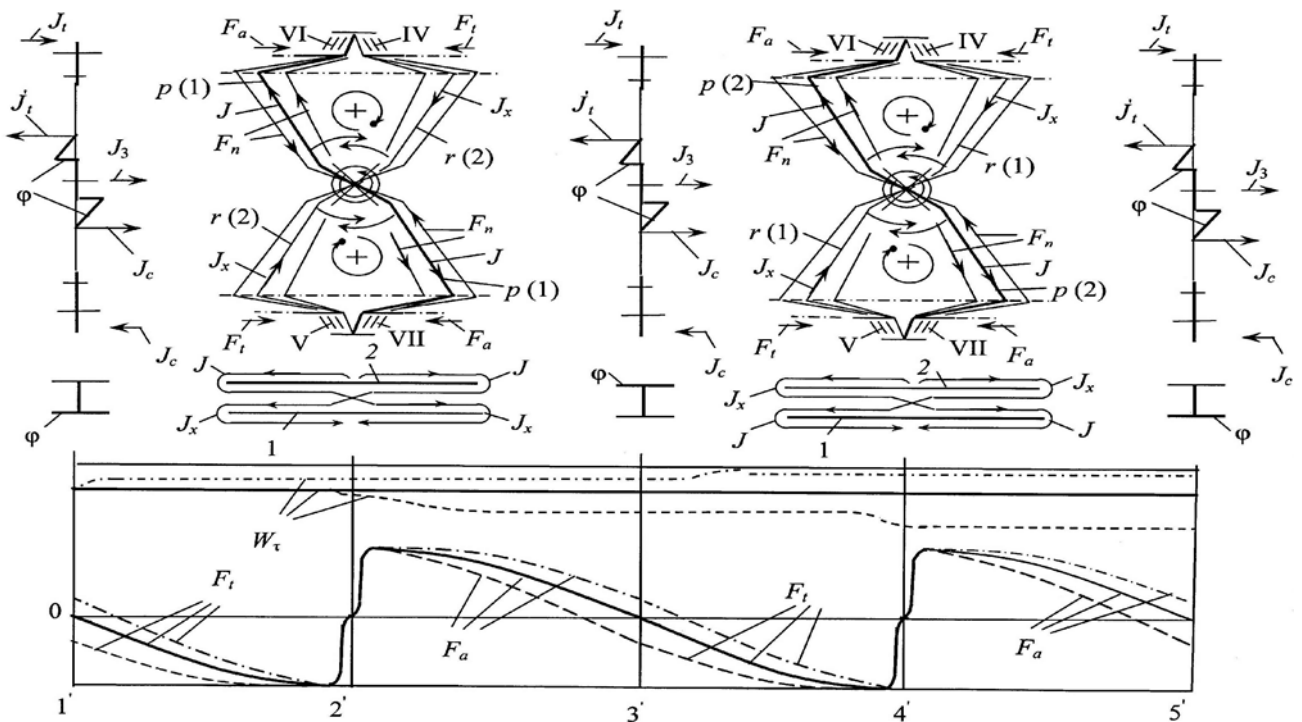


Рис. 4. Схема стационарного движения в системе (в средней части рисунка приведен вид системы сверху); штрих-пунктир – режим преобладания движущих сил, штриховые линии – преобладание сил трения

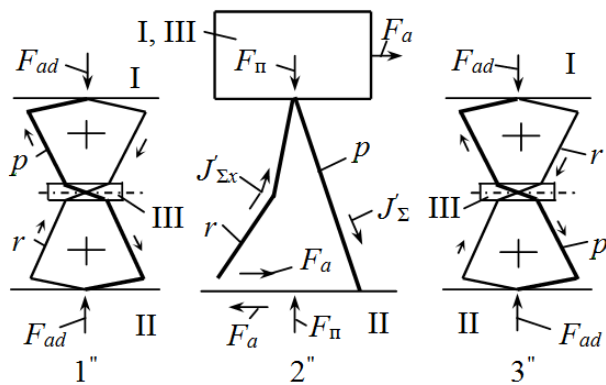


Рис. 5. Принципиальная схема гиперцикла взаимодействий
1'-3' – состояния системы

Заключение. Процесс фрикционного взаимодействия, представляющий собой комплекс макроскопического движения и его взаимодействия, главным образом контактного, со средой, занимает высший уровень в иерархии естественных процессов и осуществляется путем подвода и преобразования энергии внешней среды в системе.

Повышение уровня взаимодействия осуществляется последовательной реализацией этапов ориентации плоскостей сосредоточения фрикционных связей в направлении движения и формирования ориентированных зон потенциала в

процессе предварительного смещения, страгивания, направленного перемещения тел и далее – перехода к организованным системам и организованному процессу.

Обеспечение необходимого уровня процесса и его повышение обеспечиваются формированием и перемещением третьего тела (контактного излучателя трибоимпульса) в полях поверхностных и потенциальных сил в направлении, нормальном направлению движения, сопровождающимся повышением уровня напряженности полей сил и потенциала третьего тела (трибопотенциала).

Достижение нового качественного уровня систем должно обеспечиваться повышением напряженности полей сил сжатия поверхностного слоя и сверхдавлением на фрикционном контакте, по крайней мере на начальном этапе формирования систем.

[1] Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 1. Механика, 2009. – 656 с.

[2] Бородай А.В. О трении тел как факторе движения / А.В. Бородай, Е.В. Скринников / Механика и трибология транспортных систем: сборник статей международной научной конференции, Рост. гос. ун-т путей сообщения, Ростов н/Д, 2021. – С. 111-117.

ТВЁРДОСМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Броновец М.А.

E-mail: brnovets@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

В статье приведены история создания, направления исследований и трибологические характеристики твёрдосмазочных покрытий для узлов трения космической техники. Определены области их применения. Приведены значения трибологических параметров покрытий в зависимости от давления на контакте, температуры и окружающей среды. Показаны пути снижения коэффициентов трения в трибологических сопряжениях и повышения их износостойкости в космической технике.

Ключевые слова: открытый космос, космическая трибология, испытания материалов в вакуумных камерах, исследования на орбитах Земли и Луны.

HARD LUBRICATION COATINGS IN SPACE TECHNOLOGY

Bronovets M.A.

The article presents the history of creation, directions of research and tribological characteristics of hard lubrication coatings for friction units of space technology. The areas of their application are determined. The values of the tribological parameters of the coatings are given depending on the contact pressure, temperature and environment. The ways of reducing friction coefficients in tribological units and increasing their wear resistance in space technology are shown.

Keywords: outer space, space tribology, testing of materials in vacuum chambers, research in the orbits of the Earth and the Moon.

Введение

Один из первых космических спутников не вышел на орбиту по причине холодного схватывания в шарнирном соединении. С.П. Королёв позвонил И.В. Крагельскому и попросил его срочно приехать к нему в КБ.

Как рассказывал Игорь Викторович, когда он вошёл в кабинет С.П. Королёва, в нем находилось человек 20 инженеров и учёных, склонившихся над чертежами. С.П. Королёв спросил Игоря Викторовича, что надо сделать для устранения этой проблемы. Крагельский, ни минуточку не раздумывая, сказал – нанести на одну из поверхностей шарнира покрытие из золота. Королёв: какой толщины? Крагельский: 1-2 мкм. Королёв: по какой технологии? И.В. Крагельский: так, как Вы наносите золото на гербы (которые тогда устанавливались на космические изделия). Королёв говорит одному из своих сотрудников: внесите технологию на чертёж, Игорь Викторович, а Вы распишитесь на чертеже.

Крагельский рассказывал: я уверенно взял карандаш и хотел расписываться, у меня никаких сомнений в правильности решения не было, единственное, что я не мог с ходу обосновать – толщину покрытия, но это не имело принципиального значения. Королёв в это время говорит: если спутник успешно выйдет на орбиту, Вы получите большую премию, если по этой причине не выйдет, то Вас посадят в тюрьму. Игорь Викторович задумался. С.П. Королёв говорит: все Вы, учёные, как давать безответственные рекомендации, Вы это делаете не раздумывая, а как взять на себя ответственность, то сразу начинаете думать.

Это был первый в мире опыт применения твёрдосмазочных покрытий в узлах трения космической техники. Полёт спутника прошёл успешно. Он являлся началом применения таких покрытий в космических изделиях, применяемых в открытом космосе. Он привлек внимание конструкторов к важности трибологии для развития перспективной космической техники.

С.П. Королёв обратился к Президенту АН СССР академику А.Н. Несмеянову с предложением создать в Академии наук СССР Научный совет по трению и смазкам, который бы работал в области космической тематики. Он был создан в 1961 году. Его возглавил сам академик А.Н. Несмеянов. Его заместителями были Вице-Президенты АН СССР по соответствующим направлениям научных работ.

Создание АСП-пластиков

Одним из направлений работ было использование для этих целей специально

синтезированных термостойких полимеров – полигетероариленов, на основе которых было начато создание новых типов антифрикционных материалов – полимерных самосмазывающихся пластмасс.

Научную основу создания нового современного поколения самосмазывающихся пластмасс обеспечили фундаментальные исследования по изучению связи химического строения новых классов полимеров и их износостойкости, которые выполнялись в Институте элементоорганических соединений РАН им. А.Н. Несмеянова.

Оказалось, что в этой сложной научной проблеме можно выделить два основных показателя – термостойкость и плотность энергии когезии, которые определяют характер трибохимических процессов и саму возможность использования полигетероариленов в качестве связующих самосмазывающихся пластмасс.

Особенностью ряда термостойких полигетероариленов, определяющих их устойчивость в процессе трения, является особый характер трибодеструкции, приводящий к образованию в зоне "третьего тела" наряду с "деструктурированными" молекулами, как это наблюдается у значительного количества шитого, упрочненного полимера. При этом этот эффект значительно усиливается при введении некоторых самосмазывающихся наполнителей. В процессе этих опытов удалось показать, что у некоторых термостойких полимеров и в полимерных системах низкомолекулярные продукты деструкции играют роль "трибохимической смазки", снижая коэффициент трения и, в то же время, стабилизируя трение и износ наполненных полимерных систем.

Были изучены сложные наполненные полимерные системы на основе твердых смазок (халькогенидов металлов, графитов, фторсодержащих соединений и др.). В этих исследованиях было показано, что в трибохимических процессах дисульфид молибдена, основная промышленная твердая смазка, играет роль активного катализатора, что создало новые возможности для разработки промышленно ценных материалов.

На основе обнаруженного эффекта разработаны самосмазывающиеся материалы ТЕСАН, ПОЛИАР, ЭСТЕРАН-51.

В узлах трения механизмов прошли широкую апробацию в космическом пространстве ТСП: ВНИИ НП-212, ВНИИ НП-213, ВНИИ НП-230, ВНИИ НП-512. Твёрдосмазочное покрытие ВНИИ

НП-212 испытано в открытом космосе в специальном космическом эксперименте на орбите Луны [1].

В продолжение этих работ синтезировано поколение самосмазывающихся покрытий типа ЭОНИТ, которые обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, сохраняющимся от криогенных температур до 400 °С.

Самосмазывающиеся покрытия широко используются для космических станций и аппаратов (солнечные батареи, антенны, поворотные сопла, люки, поворотные штанги, механизмы выноса приборов, створки приборных отсеков, узлы пирозамков, поворотные крышки приборов, механизмы приборов навигации, поворотные защитные системы различных приборных устройств).

Твёрдые смазочные покрытия представляют собой смесь порошкообразных смазочных материалов, диспергированных в связующих материалах и разбавленных растворителями до необходимой вязкости для нанесения их напылением на поверхность трения с последующей термообработкой.

Покрывтие ЭОНИТ-3

Покрывтие ЭОНИТ-3 – представляет собой суспензию на основе полиаминимидной смолы ПАИС, модифицированной мочевино-формальдегидной смолой и содержащей в качестве антифрикционного компонента смесь графита и дисульфида молибдена. Проведенными исследованиями было показано, что оптимальные и стабильные антифрикционные и физико-механические свойства покрытия устанавливаются после двух часов термообработки при 200 °С.

Приведём наиболее важные характеристики покрытия ЭОНИТ-3, полученные в промышленных испытаниях по схемам «вал-втулка» и «индентор-диск»: зависимость коэффициента трения от давления на контакте и ресурса работы сопряжений в вакууме 10^{-4} мм.рт.ст. в зависимости от давления при температурах 20 °С, 250 °С и 400 °С

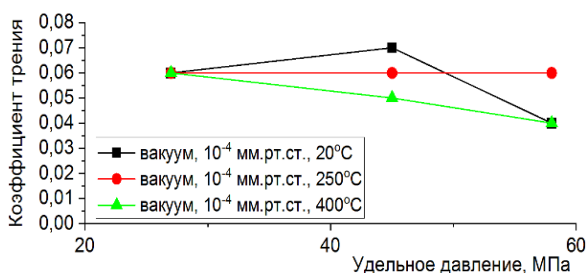


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от удельного давления и температуры

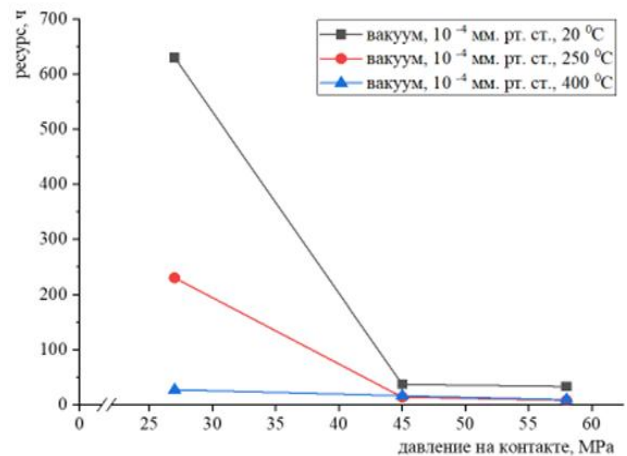


Рис. 2. Зависимость ресурса сопряжений от давления на контакте и температуры

Антифрикционные твердосмазочные покрытия на основе углеродных волокон

Одним из таких материалов является ЭПАН – композитный материал на основе углерода – углеродных волокон. В нём используется мелкодисперсный порошок дисульфида молибдена – и связующие вещества: фенол, перекись, силиконовые смолы.

Преимущества: малая испаряемость в вакууме, низкий коэффициент трения, высокая работоспособность в широком диапазоне нагрузок и широком диапазоне температур (-200 °С... + 350 °С), стабильность под воздействием космических излучений, работоспособность в широком диапазоне нагрузок.

Оптимальная толщина покрытия 15 ± 5 мкм.

В таблице 1 приведены результаты испытаний твёрдосмазочного покрытия ЭПАН по схеме кольцо-кольцо на воздухе при различных удельных давлениях на контакте и различных скоростях скольжения при трении по МДО-покрытию.

Как видно из таблицы 1 при высокой чистоте обработки трущихся поверхностей удаётся получить чрезвычайно низкие коэффициенты трения, которые снижаются с увеличением удельного давления на контакте и практически не зависят от скорости скольжения в исследованном диапазоне.

Коэффициенты трения покрытия ЭПАН в значительной мере зависят от материала и характеристик контртела в паре трения. Особый интерес представляет фрикционное взаимодействие с покрытиями на лёгких сплавах, в частности с покрытием, полученным методом микродугового оксидирования (МДО-покрытие) на алюминиевых сплавах.

Табл. 1. Коэффициенты трения покрытий ЭПАН и МДО

Сочетание материалов	$P_{уд.}, \text{МПа} \cdot 10^2$	$V, \text{м/с}$	f
ЭПАН- МДО	3,9	0,2	0,006
		1,0	0,006
		2,0	0,008
	7,8	0,2	0,003
		1,0	0,006
		2,0	0,003
	11,8	0,2	0,003
		1,0	0,004
		2,0	0,002

Покрывтие MODENGY

В последнее время проходит испытания новое антифрикционное твердосмазочное покрытие MODENGY. В исходном виде оно представляет собой суспензии порошков твердых смазок, связующих веществ органической и неорганической природы и растворителей. В качестве связующих веществ применяются эпоксидные и феноформальдегидные смолы, полиамид-имиды, полиуретаны, силикаты, а также алюмофосфатные и алюмохромфосфатные материалы.

При проведении испытаний в вакуумной камере в лабораторных условиях по схеме «шар (сталь 100Cr6) – диск» возвратно-поступательного движения покрытие MODENGY 1014 имеет коэффициент трения 0,026 при давлении 10^{-4} Па и температуре 250 °С [2]. Покрытие ВНИИПН-212, с которым производится сравнение MODENGY в работе [2], при испытаниях по схеме «шар-плоскость» вращательного движения со скоростью скольжения 0,01 м/с и контактном давлении 10,76 МПа в наземной вакуумной камере имело установившиеся коэффициенты трения 0,04-0,06 и коэффициенты трения при тех же параметрах контактного взаимодействия на орбите Луны 0,03-0,02 [1].

Испытания покрытий MODENGY продолжаются. Прежде всего, требуются параметры износостойкости этого покрытия при длительной работе в космических условиях.

Современные требования и составы покрытий

Современные задачи развития космической техники требуют от самосмазывающихся материалов многолетней устойчивой работы космических станций и аппаратов. Требуется создание новых, более износостойких самосмазывающихся материалов и покрытий, объединяющих свойства как полимера, так и более термостойких керамических материалов, что позволит обеспечить возрастание ресурса работы при температурах до 400 °С с увеличением нагрузочной способности.

В настоящее время в качестве твёрдых смазочных покрытий используется большое количество веществ, как органических - мыла, жиры, воск, некоторые полимеры (ПТФЭ, полиэтилен), так и неорганических - природные и синтетические вещества преимущественно слоистого кристаллического строения (графит и различные продукты его превращений, халькогениды металлов, дисульфид молибдена, тальк, гексагональный нитрид бора, фторированный графит, графен, углеродные волокна), мягких металлов и их сплавов (индий, олово, свинец, серебро, золото, бронза, латунь, баббит), солей металлов (сульфиды, серениды, фториды, хлориды, иодиды, оксиды, гидроксиды) и стекол (оксид бора, силикаты, фосфаты).

Сравнительно недавно структуры твёрдых смазочных покрытий дополнили наноразмерные соединения углерода (фуллерены, трубки, луковицы, алмазы, волокна) и других веществ (нитридная и оксидная керамики, нано-MoS₂, BN)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер гранта 22-49-02010).

[1] Bronovets M. A., Yarosh V. M., Moisheev A. A. Investigation of the hard lubrication coatings in open space around the Moon //Tribotest Journal. – 2002. – Т. 1. – №. 1. – С. 301-312.

[2] Прожега М.В., Решиков Е.О., Константинов Е.О. Исследования антифрикционных покрытий дисульфида молибдена в экстремальных условиях эксплуатации. // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология», Гомель, Беларусь, 28-30 июня 2022 г. – С. 95.

СПОСОБ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ

¹Быкова А.Д. *, ¹Марков М.А., ²Кравченко И.Н.

*E-mail: bykova.ad@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет),
Санкт-Петербург, Россия;

²Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Москва, Россия.

Разработана технология формирования износостойких покрытий, включающая в себя комбинацию методов «холодного» газодинамического напыления и микродугового оксидирования (МДО) для защиты стальных деталей от износа и восстановления изношенных алюминиевых деталей. Также предложен подход к дополнительному улучшению триботехнических характеристик МДО-покрытий, позволяющий использовать пористую структуру поверхностного слоя МДО-покрытия как матрицу для формирования композиционных покрытий за счет заполнения пористости поверхности твердосмазочным материалом.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, износостойкие покрытия, триботехнические характеристики, твердосмазочные материалы.

Введение

Известно, что изнашивание рабочих поверхностей узлов трения приводит к нарушению эксплуатационных свойств машин и механизмов, а также является одной из главных причин наступления критического состояния узлов трения. В настоящее время для продления срока службы трибосопряжений наряду с разработкой новых материалов широко используют различные способы модификации поверхностей, например, применяют механическое упрочнение, химико-термическую обработку, закалку лазерным воздействием и токами высокой частоты, используются различные методы нанесения покрытий [1]. В результате формируется поверхностный слой со структурой, свойствами и химическим составом значительно отличающийся от основного материала детали.

В машиностроении наиболее распространенными конструкционными материалами являются стали различных марок из-за сочетания таких свойств, как высокая вязкость и прочность на разрыв, хорошая способность к механической обработке и низкая стоимость [2]. При этом одной

INCREASING WEAR RESISTANCE OF FRICTION PAIRS BY FORMING WEAR-RESISTANT COMPOSITE CERAMIC COATINGS ON WORKING SURFACES

Bykova A.D., Markov M.A., Kravchenko I.N.

A technology has been developed for the formation of wear-resistant coatings, which includes a combination of the methods of "cold" gas-dynamic spraying and micro-arc oxidation (MAO) to protect steel parts from wear and restore worn aluminum parts. An approach is also proposed to further improve the tribotechnical characteristics of MAO coatings, which makes it possible to use the porous structure of the surface layer of MAO coatings as a matrix for the formation of composite coatings by filling the surface porosity with a solid lubricant.

Keywords: microarc oxidation, wear-resistant coatings, tribotechnical characteristics, solid lubricants.

из главных причин уменьшения срока службы стальных деталей является коррозионно-механическое разрушение. Перспективным решением этой проблемы является создание на поверхностях композиционного покрытия, для чего рационально комбинировать нанесение слоя алюминия с последующим использованием методов обработки поверхности, позволяющих превратить поверхность покрытия в оксид. В данной работе для нанесения алюминиевого слоя на стальную подложку был выбран метод «холодного» газодинамического напыления (ХГДН), после чего проводилось упрочнение поверхности методом микродугового оксидирования (МДО). Оксидный слой, образованный методом МДО, обладает наибольшими твердостью, износостойкостью и высокой адгезией к подложке за счет химического соединения с ней [3]. Одной из главных сложностей применения покрытий МДО в качестве триботехнического материала являются высокие значения коэффициента трения и необходимость механической обработки технологического поверхностного слоя для ликвидации пористости и

снижения шероховатости поверхности. В некоторых ситуациях зашлифовка поверхностного слоя МДО-покрытия затруднительна, например, для деталей сложных форм. Изучению снижения пористости поверхностного слоя МДО-покрытий уделяется большое внимание, поскольку величина пористости существенно влияет как на физико-механические, так и на триботехнические характеристики покрытий, поэтому для расширения диапазона триботехнических применений МДО-покрытий актуальной становится задача достижения минимальной пористости поверхностного слоя, путем заполнения пор покрытия антифрикционным материалом, который в процессе трения выходил бы на поверхность и работал как смазочный материал.

Цель работы – повышение износостойкости подвижных сопряжений, разработка технологии формирования протекторных покрытий, включающей в себя комбинирование методов «холодного» газодинамического напыления и микродугового оксидирования (МДО) для защиты стальных деталей от износа и восстановления изношенных алюминиевых деталей, а также поиск подхода к дополнительному улучшению триботехнических характеристик МДО-покрытий, позволяющий использовать пористую структуру поверхностного слоя МДО-покрытия как матрицу для формирования композиционных покрытий за счет заполнения пористости поверхности твердосмазочным материалом.

Материалы и методы

Для получения покрытий в качестве основы использовали образцы размером 50x20x3 мм, изготовленные из алюминиевого сплава АК7ч и АОЗ-7.

Для проведения «холодного» газодинамического напыления (ХГДН) был использован алюминиевый порошок марки А-80-13 с добавлением 40 % масс. порошка корунда (технологическая добавка) марки 25А зернистостью F360.

Порошок измельчали и просеивали с целью выделения необходимой для напыления фракции 10-60 мкм.

Холодное газодинамическое напыление, при котором формируется прочный металлический слой при взаимодействии двухфазного сверхзвукового потока с поверхностью [4], осуществляли на установке «Димет-403». После нанесения покрытия ХГДН и соответствующей механической обработки, проводили микродуговое оксидирование (МДО). При пропускании тока большой плотности через границу раздела металл-электролит создаются условия, когда на поверхности металла возникают

микродуговые разряды с высокими локальными температурами. Результатом действия разрядов в условиях интенсивного теплоотвода в электролит является формирование тонкослойного оксидно-керамического покрытия [3]. МДО осуществляли на установке ИПТ-1000.

В качестве рабочего раствора при МДО использовали электролит силикатно-щелочной, состав: гидроксид калия – 2 г/л; жидкое стекло – 8 г/л, остальное – вода. Продолжительность МДО составляла 1,5 час в анодно-катодном режиме при плотности переменного тока 13-15 А/дм².

Никелирование после МДО проводили в специально разработанном электролите, содержащем [5]: никель серноокислый 35,0-55,0 г/л; ацетат натрия 25,0-30,0 г/л; уксусную кислоту 4,5-5,0 мл/л; натрия ларилсульфат 0,1-1 г/л; рН 3,5. Плотность тока 0,1-1,0 А/дм². Продолжительность никелирования составила 1 ч.

Дисперсность порошковых материалов измерялась методом лазерного дифракционного анализа с помощью прибора Malvern Mastersizer 2000.

Для оценки износостойкости покрытий использовали машину трения «МТУ-1» по схеме «вращающиеся пальчики из стали 18ХГТ – неподвижный диск с покрытием». Площадь контакта составляла 1,5 см², продолжительность испытаний – 20 часов, нагрузка – 1,5 МПа при частоте вращения 580 мин⁻¹.

Маслоемкость МДО-покрытий определяли по ГОСТ 9.302-88.

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования – соглашение № 13.ЦКП.21.0014 (075-11-2021-068). Уникальный идентификационный номер - RF----2296.61321X0014.

Результаты и обсуждение

На поверхности стальных образцов порошковым материалом А-80-13 были сформированы алюминиевые покрытия толщиной $h = 200$ мкм. Упрочнение поверхности микродуговым оксидированием в силикатно-щелочном электролите привело к формированию внешнего композиционного керамического слоя, при этом толщина переходного алюминиевого слоя к основе составила $h \approx 70$ мкм. Фазовый состав оксидно-керамического слоя представлен основной

тугоплавкой и термически стойкой фазой муллита сложного стехиометрического состава, обладающего некоторой пластичностью, по сравнению с оксидом алюминия, а также незначительным содержанием α -, η - Al_2O_3 и аморфной фазы SiO_2 , что объясняет наличие на поверхности образцов технологического слоя [6].

На рис. 1 показаны результаты износа покрытий и образцов-свидетелей в ходе трибологических испытаний. В табл.1 приведены данные по скорости изнашивания сравниваемых пар трения.

Установлено, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий, сформированных «холодным» газодинамическим напылением, примерно в 3,1...3,3 раза выше износостойкости не упрочненных покрытий и в 2,2...2,5 раза выше износостойкости алюминиевого сплава АК7ч, принятого за эталон сравнения. При этом следует отметить, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий несколько ниже износостойкости оксидно-керамических покрытий, полученных на алюминиевых сплавах.

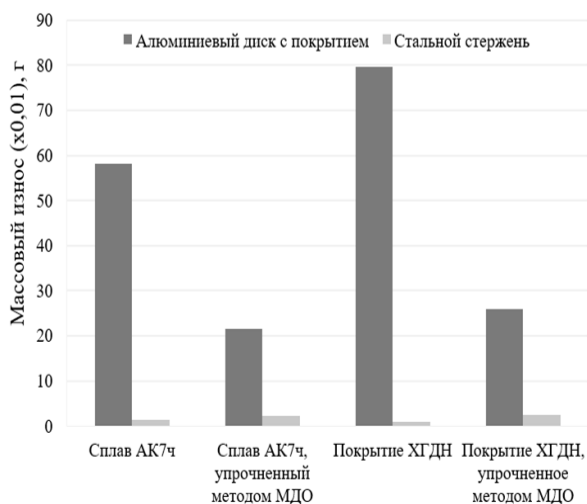


Рис. 1. Результаты испытаний пар трения «диск - пальчики»

Табл. 1. Оценка скорости изнашивания пар трения

Испытываемый материал	Скорость изнашивания пары трения (x0,01), г/ч
Сплав АК7ч	2,97
Сплав АК7ч, упрочненный методом МДО	1,19
Покрытие ХГДН	4,03
Покрытие ХГДН, упрочненное методом МДО	1,41

Метод МДО позволяет получить очень твердые керамические покрытия с высокой адгезией, а также с особой морфологией, которая изменяется от плотной области около границы раздела с металлом основы до пористой внешней области. Такие свойства означают, что МДО-покрытия могут быть

идеальным подслоем для нанесения на них твердых смазочных материалов, которые могут захватываться внешними порами и обеспечивать резервуары для трибологической контактной смазки.

Поскольку существенный интерес для изучения триботехнических свойств МДО-покрытий представляет изучение влияния на трибологические характеристики наличия твердосмазочных материалов, была проведена апробация нанесения на МДО-покрытие поверхностного слоя никеля. Никелевое покрытие формировали методом электрохимического осаждения металла на поверхность и в поры МДО-покрытия [5]. Никель, являющийся твердосмазочным материалом и присутствующий в зоне фрикционного контакта, улучшает прирабатываемость поверхностей в паре трения, а также в условиях «сухого» трения способен снижать коэффициент трения [7, 8].

Трибологические параметры пар трения с МДО-покрытием определялись в следующем порядке. Сначала образцы прирабатывали до образования видимой контактной дорожки на плоской поверхности диска под нагрузкой 0,17 МПа со скоростью скольжения 6,75 м/с. Регистрировалось текущее значение момента трения, длина пути трения и время, которое требуется для появления дорожки износа. Затем были изучены зависимости коэффициента трения и износа от значения контактного давления. Данные характеристики определялись на скорости скольжения 6,75 м/с с помощью постепенного увеличения нагрузки до предельного значения (критической точки), при которой наблюдалось резкое увеличение момента трения и износа (зона пластической деформации).

График зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки представлен на рисунке 2.

По результатам испытаний видно, что при трении образца без МДО-покрытия о сталь 18ХГТ в установившемся режиме трения коэффициент трения составляет 0,06...0,07. Хотя максимальное значение нагрузки для данной пары трения составляло 7 МПа, даже при нагрузке $p = 3,7$ МПа можно было наблюдать резкие скачки силы трения и нестабильность процесса трения. На значении нагрузки $p = 4,3$ МПа происходит мгновенное схватывание образцов, но следов задиров на трущихся поверхностях не обнаружено. При увеличении нагрузки до 7 МПа происходит резкое увеличение силы трения в зоне контакта, что приводит к схватыванию и истиранию поверхностей.

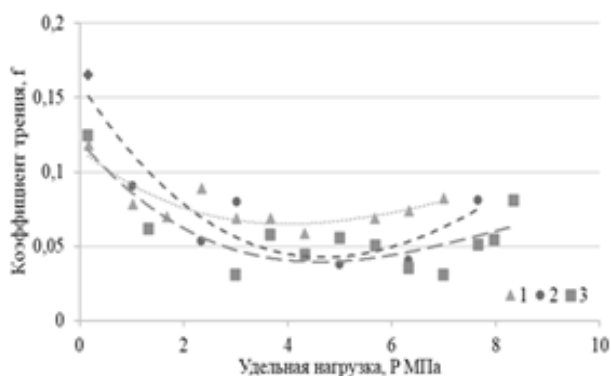


Рис. 2. График зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки. Трение образцов из стали 18ХГТ по следующим материалам: ▲ - пара трения № 1 (алюминиевый сплав); ● - № 2 (алюминиевый сплав с МДО - покрытием); ■ - № 3 (алюминиевый сплав АО3-7 с МДО-покрытием, модифицированным антифрикционным слоем)

Микродуговое оксидирование поверхности образца позволяет понизить коэффициент трения в паре трения № 2 (со сталью 18ХГТ) на 40 ... 45% (до 0,04 ... 0,05), а также нагрузочная способность пары трения увеличивается до 7,7 МПа. Процесс трения стабилен до нагрузки $p = 6,3$ МПа (в отличие от пары трения № 1), после этого значения начинаются колебания и скачки силы трения. При повышении нагрузки до $p = 7,7$ МПа поверхности начинают схватываться.

Нанесение тонких слоев антифрикционных материалов на поверхность МДО-покрытия (пара трения № 3) позволяет увеличить нагрузочную способность на 15...20% в сравнении с парой трения № 1 (до 8,3 МПа) с коэффициентом трения в данной паре трения 0,03...0,05. Также как и в паре трения № 2, процесс трения стабилен на всем диапазоне приложенной нагрузки. При максимальной нагрузке $p = 8,3$ МПа через две минуты испытаний сила трения увеличивается, в результате чего поверхность образцов начинает схватываться.

Существенный интерес представляет изучение такого свойства покрытий, как маслоспособность, поскольку количество масла, которое способно адсорбировать МДО-покрытие при трении в присутствии смазки, оказывает существенное влияние на его изнашивание. Поскольку сущность процесса микродугового оксидирования подразумевает присутствие некоторой сквозной и замкнутой пористости в синтезируемом покрытии, то маслоспособность МДО-покрытий будет зависеть от значений этих параметров. Также очевидно, что присутствие определенного значения пористости МДО-покрытий может положительно повлиять на качество их работы в смазочной среде.

Исследование влияния концентрации жидкого стекла на маслоспособность покрытий при синтезе в

электролите на повышенной плотности тока на аноде показало, что повышение концентрации в электролите Na_2SiO_3 при постоянных остальных параметрах процесса приводит к росту маслоспособности покрытий (рис. 3, а).

Такая зависимость обусловлена тем, что с увеличением концентрации пассиватора, которым является жидкое стекло, происходит ускорение синтеза МДО-покрытий из-за роста мощности микроплазменных разрядов.

С повышением энергии микродугового разряда увеличиваются размеры кристаллов МДО-покрытия, вследствие чего микродуговые разряды появляются на более удаленном расстоянии друг от друга, не успевая сплавлять границы образующихся кристаллов [9, 10], что ведет к повышению процента пористости.

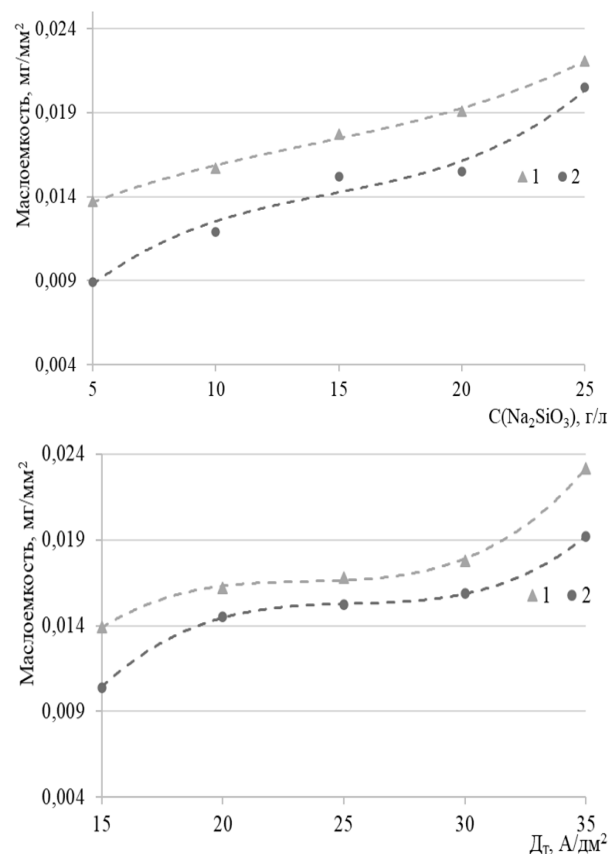


Рис. 3. Зависимость маслоспособности покрытий от (а) концентрации Na_2SiO_3 в электролите ($T = 1,5$ часа; СКОН = 2 г/л, $D_t = 25$ А/дм²) и (б) от плотности тока ($T = 90$ мин, СКОН = 2 г/л, $C\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 15$ г/л): 1 – сплав АК7ч; 2 – сплав АО3-7

Исследование влияния плотности тока на маслоспособность покрытий при остальных постоянных параметрах процесса показало, что независимо от марки сплава, подвергаемого микродуговому оксидированию, с ростом плотности тока повышается и маслоспособность покрытий (рис. 3б) по аналогичной причине.

Таким образом, установлено, что существует возможность варьировать маслосъемкость МДО-покрытий с помощью изменения параметров процесса микродугового оксидирования. Очевидно, что для алюминиевых деталей с МДО-покрытиями, предназначенных для работы в парах трения, целесообразно рекомендовать покрытия с повышенной маслосъемкостью.

Заключение

1. Исследованы триботехнические свойства композиционных покрытий, полученных комбинацией методов МДО и ХГДН, установлено, что износостойкость упрочненных МДО алюминиевых покрытий, сформированных «холодным» газодинамическим напылением, примерно в 3,1...3,3 раза выше износостойкости не упрочненных покрытий и в 2,2...2,5 раза выше износостойкости алюминиевого сплава АК7ч, принятого за эталон сравнения. Следует отметить, что износостойкость упрочненных методом МДО алюминиевых покрытий, несколько ниже износостойкости оксидно-керамических покрытий, полученных непосредственно на алюминиевых сплавах.

2. Разработана технология создания антифрикционных композиционных покрытий, позволяющая использовать пористую структуру поверхностного слоя МДО-покрытия как матрицу для формирования композиционных покрытий с улучшенными триботехническими характеристиками, за счет заполнения пористости поверхности МДО-покрытия никелем, который работает как твердосмазочный материал в процессе трения. Исследованы триботехнические свойства композиционных антифрикционных покрытий МДО-Ni, установлено, что заполнение пор МДО-покрытий никелем снижает коэффициент трения, что обеспечивает повышение износостойкости поверхностей трения по сравнению с традиционными МДО-покрытиями.

3. Установлено, что существует возможность варьировать маслосъемкость МДО-покрытий с помощью изменения параметров процесса микродугового оксидирования. Экспериментально обосновано влияние токовых характеристик и концентрации силикатно-щелочного электролита на маслосъемкость формируемых керамических покрытий в процессе микродугового оксидирования алюминия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (Соглашение № 22-29-00800).*

- [1] Holmberg K., Matthews A. Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, Second Edition, vol. № 56, B. Briscoe, Ed., Elsevier Science: Tribology and Interface Engineering Series, -2009, -p. 576.
- [2] Солнцев Ю.П., Прякин Е.И., Войкун Ф. Материаловедение // СПб.: Изд.: Химия, 2002. – 696 с.
- [3] Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Том 2. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.
- [4] Алхимов А.П. Холодное газодинамическое напыление / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. – Новосибирск: Физматлит, 2010. – 536 с.
- [5] Пат. 2543584 Российская Федерация, МПК C25 D 3/12. Электролит на водной основе для никелирования изделий из стали, алюминия, титана, меди и их сплавов / Красиков А.В., Ежов А.А.; № 2013134110/02; заявл. 19.07.13; опубл. 10.03.15.
- [6] Кузнецов Ю.А. Особенности механической обработки оксидно-керамических покрытий, полученных плазменно-электролитическим оксидированием / Ю.А. Кузнецов, И.Н. Кравченко, В.В. Гончаренко, М.А. Глинский // Технология металлов. – 2017. – № 10. – С. 18-24.
- [7] Готовцев А.А., Котенок И.П. Проектирование цепных передач, Справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 336 с.
- [8] Ажогин Ф.Ф., Беленький М.А. и др. Гальванотехника. Справочник. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
- [9] Снежко Л.А., Черненко В.И. Энергетические параметры процесса получения силикатных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда. // Электронная обработка материалов. – 1983. – Т. 110. – № 2. – С. 25-28.
- [10] Каракозов Э.С., Чавдаров А.В., Барыкин Н.В. Микродуговое оксидирование — перспективный процесс получения керамических покрытий. // Сварочное производство. – 1993. – Т. 6. – С. 4-7.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПУМА С ПРИСАДКАМИ В СИСТЕМЕ ГРЕБЕНЬ КОЛЕСА-РЕЛЬС

Ващишина А.П. *, Ващишин С.П. **

*E-mail: vashhi.anya@yandex.ru, **E-mail: sxrzilla@gmail.com

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия.

Проведены испытания смазочного материала Пума с выбранными присадками на определение интенсивности изнашивания и на определение количества выделившегося диффузионно-активного водорода в системе. Проанализирован принцип действия присадок и характер их взаимодействия с трущимися поверхностями. Определены присадки, которые уменьшают износ поверхности, а также присадка, которая лучше всего связывает водород.

Ключевые слова: трение, смазочный материал, износ, вязкость, присадки.

Введение

Для увеличения срока службы и износостойкости машин используются противоизносные антифрикционные присадки к смазочным маслам. Актуальным является вопрос исследования имеющихся аналогов, а также разработка и проведение испытаний новых соединений. В настоящее время с целью уменьшения износа используются системы смазывания твердыми смазочными материалами, которые наносятся на гребень перед вхождением состава в криволинейный участок пути.

Антифрикционные присадки оказывают влияние на поверхностные слои, их состав и толщину защитной пленки. Понимание механизма действия присадок позволит разработать новые виды соединений, которые будут оказывать существенное влияние на антифрикционные свойства смазочных материалов.

Были проведены экспериментальные исследования по влиянию добавок на износ и выделение диффузионно-активного водорода. Определение коэффициента трения и количество выделившегося водорода проводилось на машине трения [1]. В качестве анализируемого образца был использован вырез рельса марки Р65. В качестве контрол-образца использовалась сталь 45, применяемая как материал бандажа на тепловозах типа ТЭМ. Шероховатость поверхности рельса Р65 была выбрана в соответствии с ГОСТ № 2789-73 и

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF THE LUBRICANT PUMA WITH ADDITIVES IN THE WHEEL FLANGE RAIL SYSTEM.

Vashshishina A.P., Vashshishin S.P.

Tests of the Puma lubricant with selected additives were carried out to determine the wear rate and to determine the amount of released diffusion-active hydrogen in the system. The principle of action of additives and the nature of their interaction with rubbing surfaces are analyzed. Additives have been identified that reduce surface wear, as well as an additive that best binds hydrogen.

Keywords: friction, lubricant, wear, viscosity, additives.

составляла $R_z=25,0$ мкм, шероховатость бандажа – $R_z=12,5$ мкм. Смазочным материалом выступала смазка «Пума». В качестве дополнительных присадок использовались соединения, содержащие в своем составе сульфогруппу $R-SO_2OH$ (где R – углеводородный радикал), производные гидрохинона $C_6H_4(OH)_2$ и фосфорорганические соединения. При проведении эксперимента соотношение смазочный материал-присадка было 25:1. Испытания проводились при нагрузке 60 Н, путь трения поверхности рельса о точку на бандаже рассчитывался по выражению, приведенном в работе [2].

$$L_{расч} = \frac{\pi}{2} \left[3 \times (a + b) - \sqrt{(3 \times a + b) \times (a + 3 \times b)} \right], \quad (1)$$

Расчет вели по исходным данным диаметр колеса $d=1050$ мм, толщина гребня колеса – 25 мм, $L_r=737,194$ мм.

В течение триботехнических исследований контролировали содержание водорода в процессе испытаний в герметичной камере машины трения с одновременной непрерывной регистрацией суммарного износа. Под диффузионно-активным водородом понимаем водород, выделившийся из образцов и смазочного материала [3]. Диффузионно-активный водород ppm_{H_2} определяется как разность водорода прошедшего через трубу $ppm_{изм}$ и водорода, находящегося в окружающей среде $ppm_{окр}$.

$$ppm_{H_2} = ppm_{изм} - ppm_{окр} \quad (2)$$

Износ определялся датчиком Omron ZX1 с точностью 0,01 мкм ($\Delta 0,005$ мкм) как суммарный износ пары трения образец-контртело.

Интенсивность изнашивания рассчитывалась по формуле:

$$I_h = \frac{h}{L}, \quad (3)$$

где h – суммарный износ пары трения, L – путь трения.

Испытание каждого материала проводилось в течение 30 минут. Снятие показаний с датчиков осуществлялось с интервалом в 1 минуту.

Результаты и обсуждение

В результате испытаний с присадкой сульфосоединения при нагрузке 60 Н износ составляет 180 мкм (рис. 1, а). Износ при использовании присадки с производными гидрохинона составляет 170 мкм (рис. 1, б). Фосфорорганическая присадка – 170 мкм (рис. 1, в), смазочный материал Пума – 180 мкм (рис. 1, г).

Использование приведенных присадок уменьшает износ пары трения колесо-гребень. Высокая адсорбционная способность фосфорорганических присадок связана с активностью алкильных групп и разрывом связи Р-О в молекуле, сульфосоединение так же показывает высокую активность, сопровождающуюся разрывом связи с серой и дальнейшим образованием комплексных соединений с металлом. Присадки уменьшают износ пары трения. Интенсивность изнашивания уменьшилась на 14% при использовании гидрохинона и на 13% при добавлении сульфосодержащего агента.

В процессе исследования было измерено количество выделяющегося диффузионно-активного водорода (рис. 2).

Как видно из рисунка, наибольшее количество водорода выделяется при использовании чистого смазочного материала Пума и составляет 67 ppm. При добавлении присадок количество водорода значительно уменьшается, 40 18 и 8 ppm с использованием сульфоприсадки, производного гидрохинона и фосфорорганического соединения соответственно.

Так же была определена динамическая вязкость на приборе Vibro Viscometer SV-100 при комнатной температуре и при нагревании. Результаты исследований и реологические свойства полученных смазок приведены в таблице 1.

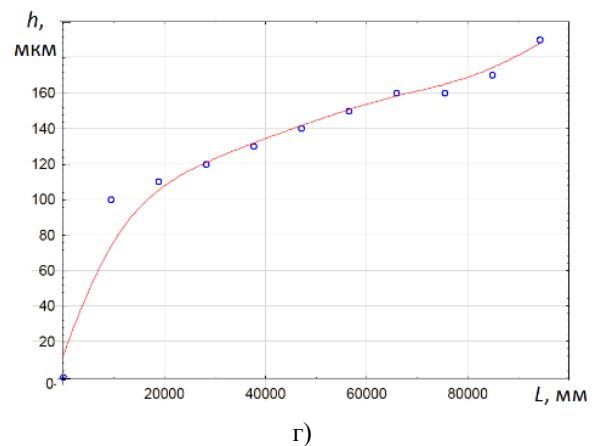
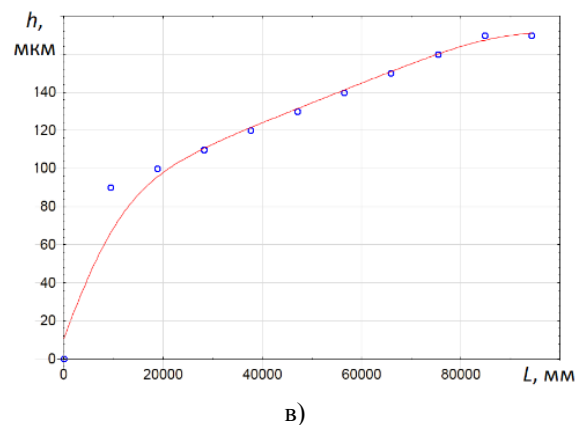
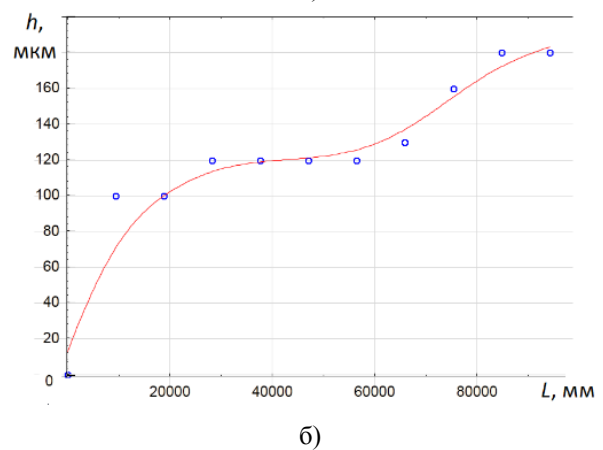
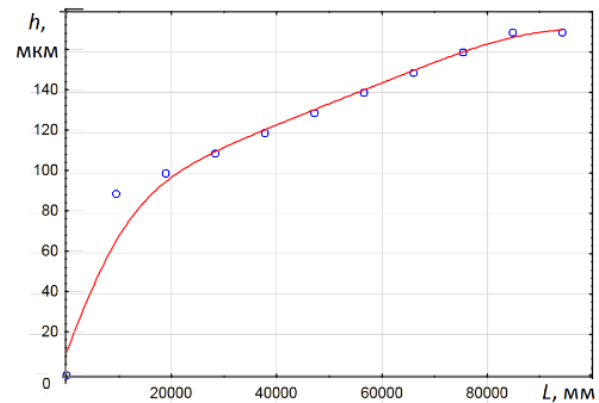


Рис. 1. Зависимость износа пары трения от пути:
а) сульфоприсадка; б) присадка производных гидрохинона;
в) фосфорорганическая присадка
г) смазочный материал Пума

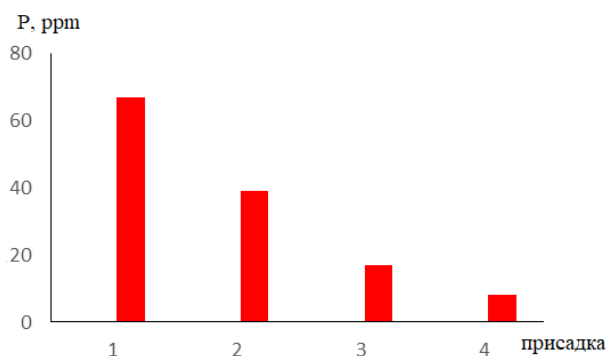


Рис. 2. Выделение диффузионно-активного водорода в анализируемой системе: 1 – Пума; 2 – Пума + сульфосоединение; 3 – Пума+ гидрохинон; 4 – Пума + фосфорорганическое соединение

Как видно из таблицы 1, при нагревании смазочного материала вязкость значительно меняется с добавлением присадок. Можно отметить, что использование сульфоприсадки явно показывает завышенные значения динамической вязкости, что говорит о высоком коэффициенте внутреннего трения и материал становится более плотным. Значения остальных материалов имеют незначительные изменения (рис. 3).

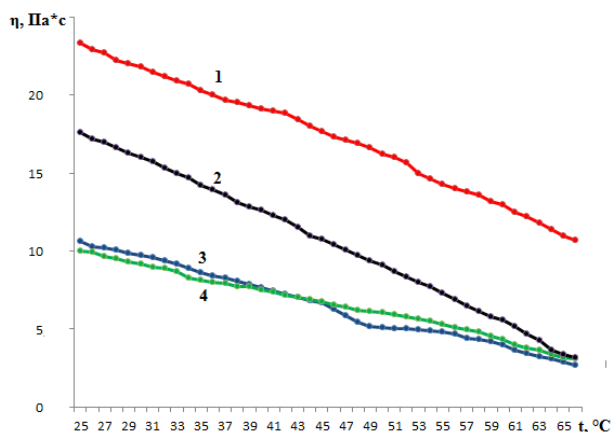


Рис. 3. Изменение динамической вязкости: 1 – сульфоприсадка; 2 – фосфорорганическая присадка; 3 – исходная Пума; 4 – гидроприсадка

Для анализа продуктов износа с поверхностей трения был проведен ИК (инфракрасный)-спектроскопический анализ исходного смазочного материала и отработанного методом нарушенного полного внутреннего отражения.

Как видно из рис. 4, в спектрах образцов увеличивается интенсивность полосы при частоте 633 см^{-1} относится к полосе поглощения Fe-OH, по сравнению с исходным образцом, что напрямую связано с увеличением концентрации железа в отработанном смазочном материале.

Табл. 1. Реологические характеристики смазочного материала «Пума» с исследуемыми присадками. Значения вязкости при нагревании смазочного материала с присадками

T, °C	Пума	Сульфо-	Гидро-	Фосфор-
	Вязкость, η Па*с			
25	10,60	23,30	10,01	17,60
26	10,30	22,90	9,90	17,20
27	10,20	22,70	9,67	17,00
28	10,04	22,20	9,50	16,60
29	9,86	22,00	9,34	16,30
30	9,73	21,80	9,14	16,00
31	9,60	21,49	9,00	15,70
32	9,37	21,20	8,90	15,30
33	9,14	20,90	8,67	15,00
34	8,89	20,68	8,25	14,70
35	8,65	20,30	8,17	14,20
36	8,40	20,00	8,00	13,90
37	8,30	19,67	7,90	13,60
38	8,08	19,50	7,75	13,10
39	7,87	19,30	7,73	12,86
40	7,65	19,10	7,50	12,60
41	7,42	19,00	7,39	12,30
42	7,21	18,80	7,20	12,00
43	7,00	18,40	7,00	11,50
44	6,80	18,00	6,89	11,00
45	6,66	17,67	6,78	10,78
46	6,30	17,34	6,57	10,40
47	5,84	17,10	6,40	10,10
48	5,46	16,89	6,23	9,73
49	5,20	16,65	6,15	9,40
50	5,11	16,23	6,05	9,10
51	5,06	16,00	5,95	8,70
52	5,00	15,66	5,80	8,34
53	4,98	15,00	5,66	8,00
54	4,90	14,60	5,50	7,69
55	4,82	14,30	5,31	7,28
56	4,70	14,00	5,10	6,92
57	4,44	13,80	4,94	6,50
58	4,34	13,60	4,80	6,13
59	4,22	13,20	4,58	5,82
60	4,00	13,00	4,34	5,60
61	3,67	12,50	4,00	5,18
62	3,44	12,20	3,79	4,70
63	3,24	11,80	3,64	4,30
64	3,10	11,40	3,40	3,67
65	2,89	11,00	3,15	3,40
66	2,70	10,70	3,07	3,20

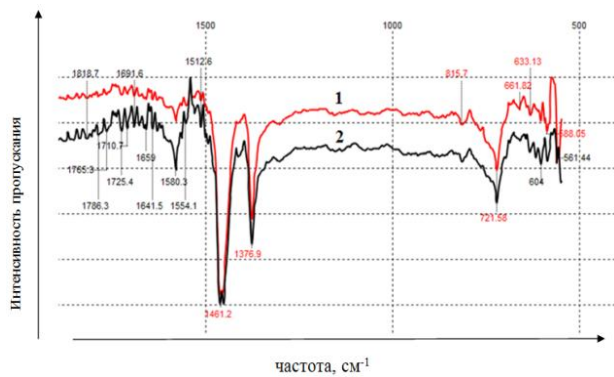


Рис. 4. ИК спектр смазочного материала:
1 – чистый смазочный материал Пума; 2 – смазочный материал после испытаний

Вычисленные значения колебаний групп Fe^{3+}O_4 и Fe^{2+}O_4 находятся в диапазоне частот от 585 до 500 см^{-1} . На спектре так же наблюдается изменение интенсивности спектральных линий в данной области, что говорит об изменении концентрации железа в материале соответственно. В ИК-спектрах активны только $\nu_3(\text{F}_2)$, $\nu_4(\text{F}_2)$ – 1104 и 613 см^{-1} соответственно. Группы SO_4^{2-} в кристаллах занимают общие положения, что приводит к снятию вырождения и расщеплению колебаний на отдельные компоненты. В области деформационных колебаний группы появляются линии, которые с различной интенсивностью регистрируются для всех направлений возбуждения (см. рис. 3). Для деформационных колебаний наблюдаются три линии – 604 , $633,15$ и $661,82 \text{ см}^{-1}$. Полуширина линий в спектрах для группы составляет $3\div 5 \text{ см}^{-1}$ и незначительно изменяется при рассмотрении спектров отработанного смазочного материала и с использованием сульфоприсадки. Полосы переменной интенсивности в области $1580,3 \text{ см}^{-1}$ и 1659 см^{-1} относятся к колебаниям углеродного скелета сопряженных полиенов и ароматических групп. Можно заметить, что интенсивность и ширина полос изменяется в отработанном смазочном материале, что говорит о разрушении структуры базовых компонентов. В области $1376,9$ и $1461,2 \text{ см}^{-1}$ находятся колебания CH_2 групп твердых жирных кислот, число полос в этой области увеличивается на одну при увеличении числа атомов С на один в цепях C_{16} – C_{21} . Изменение интенсивности спектральных линий в области $1376,9 \text{ см}^{-1}$ говорит об изменении концентрации базового масла в отработанном образце.

Выводы

Активность присадок объясняется тем, что на поверхности формируются абсорбированные слои из-за полярной природы молекул. Органические компоненты притягиваются к металлической поверхности за счет сильных поглощающих сил, полярная часть молекулы закрепляется на металлической поверхности. В результате многоповторяющихся процессов образуется многослойная матрица органических молекул, которая легко подвергается сдвигу, что снижает трение между поверхностями. Эффективность данных слоев зависит от способности полярной группы связывать водород для достаточной адсорбции и длины углеводородной цепи. Сульфосоединение представлено слоями, в которых связи атомов серы слабые, что позволяет пленке скользить и смещать слои по пути трения.

Анализ ИК спектров показал повышение концентрации металла в смазочном материале после испытаний. Интенсивность и ширина некоторых характеристических линий на ИК спектре говорит об изменении качественного состава масла, что может быть причиной возникновения новых соединений на поверхностях. Равная интенсивность изнашивания сульфоорганической и фосфорорганической присадок при значительно меньшем выделении водорода в фосфорорганической присадке свидетельствует о ее меньшем влиянии на диффузионно-активный водород. Вероятно, блокировка водорода вызвана более высокой смачиваемостью данной присадки, однако, данное утверждение требует дальнейших исследований.

[1] Shalygin M.G. Analysis reasons of wear of the locomotive wheel flange on curved sections track / M.G. Shalygin, A.P. Vashchishina // XVII International Congress "Machines. Technologies. Materials 2020". - Summer Session 09–12.09.2020, Varna, Bulgaria. –2020. – Year IV. - ISSUE 2 (17). – pp. 19-21.

[2] Mikhailov E.V. Reduction of kinematic slippage on the rail of a rail carriage wheel with a movable ridge / E.V. Mikhailov, V.A. Slashchev, S.A. Semenov // 2307-6666

[3] Stavrovsky M.E. Research of technological measures to reduce the hydrogen content of materials / M.E. Stavrovsky, M.I. Sidorov, S.G. Emelyanov, [and others]. // Bulletin of the Southwest State University. Series: Engineering and technology. – 2016. – №. 2. – pp. 20-25.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФРИКЦИОННОГО МИКРОКАПИЛЛЯРА В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ С ГРАНИЧНЫМ ТРЕНИЕМ

Веденеев М.С., Единов Д.Д., Новиков В.В.*

*E-mail: novikov-ww@mail.ru

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет», Иваново, Россия.

Получены выражения для аналитических оценок геометрических и кинетических параметров фрикционного микрокапилляра в системах с граничным трением. Проведены примеры расчетов этих параметров для модельной системы.

Ключевые слова: фрикционный микрокапилляр, граничное трение, смазка, шероховатость, пластический контакт.

Введение

Согласно современным представлениям [1-3] граничное трение шероховатых поверхностей представляет собой взаимное скольжение пятен контакта трущихся тел по поверхности друг друга. Процессы адгезии и деформации в зоне контакта составляют две компоненты трения: деформационную и адгезионную. Общее решение задачи контакта шероховатых поверхностей с учетом их упругой и пластической деформации в процессе трения и изнашивание практически невозможно. Это затрудняет теоретические расчеты процессов в зоне контакта.

Целью работы являлось создание приближенной модели, позволяющей теоретически оценивать геометрические размеры фрикционного микрокапилляра, а также кинетические условия формирования и разрушения граничных смазочных пленок на основе экспериментальных сведений о процессе.

Модель

В процессе приработки на поверхности трения при граничной смазке складывается равновесная шероховатость, представляющая собой систему параллельных микроцарапин, возникновение которой обусловлено скольжением контактирующих выступов контртела, вызывающих пластическое отеснение поверхностных объемов материала (рис. 1).

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE FRICTION MICROCAPILLARY IN CONDITIONS OF PLASTIC CONTACT OF ROUGH SURFACES IN SYSTEMS WITH BOUNDARY FRICTION

Vedeneev M.S., Edinov D.D., Novikov V.V.

Expressions for analytical estimates of geometric and kinetic parameters of a frictional microcapillary in systems with boundary friction are obtained. Examples of calculations of these parameters for a model tribosystem are carried out.

Keywords: friction microcapillary, boundary friction, lubrication, roughness, plastic contact.

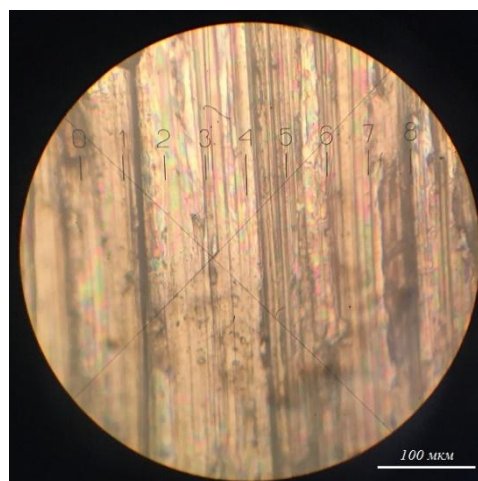


Рис. 1. Поверхность образца после трения с системой микроцарапин

Фрикционный контакт представляет собой плоский микрокапилляр с неровными шероховатыми стенками. Продольное сечение фрикционного капилляра в нашей модели представлено на рис. 2. Лишь часть наиболее выступающих шероховатостей контртела находятся в контакте с опорной поверхностью царапины. В процессе трения поверхность царапины в большем проценте времени остается ненагруженной и подвергается периодическому воздействию только тогда, когда следующая микронеровность пройдет по данному участку вновь.

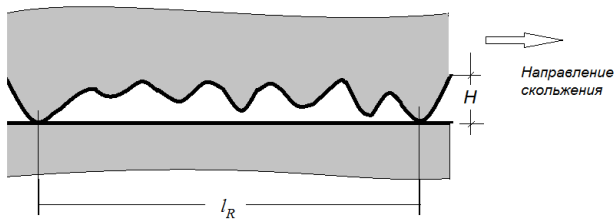


Рис. 2. Схема продольного сечения фрикционного микрокапилляра

Оценить время этого цикла нагружения возможно, если знать среднее расстояние между воздействующими микронеровностями.

Пусть микроконтакт формирует на поверхности микроцарапину длиной L и шириной b . Общая площадь царапины составляет произведение ширины на длину Lb . Если известна средняя плотность микроконтактов N , то число микроконтактов, приходящихся на эту царапину, можно найти как

$$n = Lb \cdot N. \quad (1)$$

Среднее расстояние между выступами микронеровностей l_R , формирующих царапину равняется

$$l_R = \frac{L}{n} = \frac{1}{bN}. \quad (2)$$

Для того, чтобы воспользоваться формулой (2), необходимо знать ширину царапины и среднюю плотность микроконтактов. Ширина царапины находится экспериментально прямыми измерениями ширины на поверхности трения под микроскопом. Проблемой остается экспериментальное определение средней плотности пятен микроконтакта N .

Оказалось возможным оценить среднюю плотность пятен контакта N косвенно по итогам экспериментов на трение. Примем, что все микроконтакты одинаковы, а сила трения F_τ создается взаимодействием этих контактов с поверхностью за счет пластического оттеснения. В условиях граничной смазки адгезионной составляющей можно пренебречь.

Каждый контакт создает с поверхностью пятно контакта. Зная напряжение сдвига τ , площадь пятна контакта ($\pi b^2/4$) и число этих контактов n можно найти силу трения.

$$F_\tau = \tau \left(\frac{\pi b^2}{4} \right) n. \quad (3)$$

В тоже время известно, что сила трения пропорциональна давлению на контакте по закону Амонтона — Кулона

$$F_\tau = \mu \cdot F_N = \mu \cdot p \cdot S_0, \quad (4)$$

где μ — коэффициент трения, F_N — нагрузка на трибоконтакте, p — сила нормального давления, S_0 — номинальная площадь фрикционного контакта.

Из выражений (3) на (4) после преобразований, получаем, что значение средней плотности пятен трибоконтакта на исследуемой поверхности

$$N = \frac{n}{S_0} = \frac{4\mu p}{\tau \pi b^2}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в формулу (2), получаем выражение для определения среднего расстояния между пятнами контакта на поверхности трения:

$$l_R = \frac{\pi \tau b}{4 \mu p}. \quad (6)$$

Значения коэффициента трения μ , ширины царапины b и контактного давления p легко определить непосредственно из эксперимента на трение.

Сдвиговое напряжение, которое характеризует свойства материала сопротивляться сдвигу, также можно определить оценочно по значению предела текучести материала или экспериментально по измерению усилий, затрачиваемых на формирование единичной царапины в методе склерометрирования.

Метод склерометрирования поверхности единичным индентором подробно изложен в работе [4]. Он позволяет определить удельную работу W , затрачиваемую на оттеснение материала при царапании алмазным индентором, отнесенную к объему вытесненного при царапании материала:

$$W = \frac{F_\tau}{S}, \quad (7)$$

где $S \approx 0,5 \cdot b\delta$ — площадь поперечного сечения царапины, оставляемая сферическим индентором.

Подставляя в формулу (7) значение силы трения (3) с учетом того, что зерно единично и $n = 1$, после преобразований можно получить, что

$$\tau \approx \frac{2W}{\pi} \cdot \frac{\delta}{b}. \quad (8)$$

Сдвиговое напряжение можно также оценить по значению предела текучести материала воспользовавшись третьей гипотезой прочности

$$\tau \approx \frac{\sigma_{0,2}}{2}, \quad (9)$$

где $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала при одноосном растяжении.

Зная скорость скольжения и расстояние между выступами время между циклами нагружения t_R при прохождении микронеровностей по участку поверхности царапины определяется формулой

$$t_R = \frac{l_R}{v} = \frac{\pi b \tau}{4 \mu p v}, \quad (10)$$

где v — скорость скольжения.

Оценка среднего расстояния между стенками фрикционного микрокапилляра H также возможна из данных эксперимента на трение. Известно, что в режиме гидродинамического трения шероховатости не соприкасаются, а трение обусловлено вязкостью смазочной среды, разделяющей микрокапилляр. То есть режим гидродинамического трения возникает тогда, когда зазор в капилляре превышает высоту микронеровностей. Используя формулу Петрова [2] получаем, что

$$H = \frac{\eta v}{\mu p}, \quad (11)$$

где η — динамическая вязкость смазочного материала, v — скорость скольжения, μ — коэффициент трения, p — давление на контакте.

Эксперимент

Для проведения оценочных расчетов параметров фрикционного капилляра в трибосистеме необходимы экспериментальные данные. Нами был выполнен эксперимент на трение на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск—колодка». Вращающийся диск изготавливался из закаленной стали 45 твердостью 58 HRC. Диаметр диска — 50 мм, ширина 11 мм.

Второй аналогичный диск закреплялся неподвижно. В результате получасовой приработки на поверхности неподвижного диска формировалась притертая зона трения длиной 8 мм, размеры которой оставались постоянными в течении всех последующих экспериментов.

Смазочный материал — вазелиновое масло ГОСТ 3164-78.

Режим испытаний: скорость скольжения — 0,785 м/с (300 об/мин), нагрузка 100...1400 Н, давление на контакте — 1...20 МПа.

Ширина микроцарапин на поверхности трения измерялась на микроскопе МИМ-7 с использованием окулярного микрометра МОВ-1.

Результаты и обсуждение. Результаты испытаний на машине трения СМЦ-2 приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты испытаний

Режим трения	Давление на контакте, МПа	Коэффициент трения
Граничное трение	10...14	0,12
Гидродинамическое трение	2	0,03

Примечание: пара трения «сталь 45 закаленная — сталь 45 закаленная», скорость скольжения — 0,785 м/с

Микроскопические исследования показали, что на поверхности трения складывается сеть микроцарапин шириной 7...8 мкм (рис. 1).

Расчеты по формулам показывают, что для исследуемой системы характерны следующие параметры фрикционного микрокапилляра:

3. Ширина зазора между поверхностями в режиме гидродинамического трения, а следовательно, и во фрикционном капилляре при граничном трении $\approx 0,4$ мкм.

4. Плотность микроконтактов $N \approx 60 \text{ мм}^{-2}$.

5. Среднее расстояние между опорными микронеровностями $l_R \approx 2$ мм.

6. Среднее время между воздействиями микронеровности на участок поверхности $t_R \approx 2,7$ мс. Частота воздействия — 370 Гц.

Заключение

По итогам моделирования получена система выражений, позволяющих рассчитать геометрические и кинетические параметры фрикционного микрокапилляра.

[1] Трение и смазка твёрдых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; Перевод с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина; Под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. — М.: Машиностроение, 1968. — 543 с.

[2] Мышкин Н.К., Петковец М.И. Трибология. Принципы и приложения. — Гомель: ИММС НАНБ, 2002. — 310 с.

[3] Буяновский И.А. Граничная смазка // Современная трибология: итоги и перспективы. Отв. Ред. К.В. Фролов. М.: Издательство ЛКИ, 2008. — С. 226-276.

[4] Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. — 268 с.

ПРОВЕРКА СТАБИЛЬНОСТИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Войнов К.Н.

E-mail: forstar@mail.ru

Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Здесь представлен эффективный алгоритм, чтобы показать, как исследователь должен осуществлять контроль в следующем важном действии. Есть ли использованный закон распределения, верный после сделанного традиционного теста или нет, хотя весь контроль был выполнен корректно, используя стандартные критерии. Если финальный результат не является верным, то нет возможности полагать, что определённый закон распределения может быть правильным для всей генеральной совокупности статистической информации. Статья помогает избежать любых грубых ошибок во многих заключениях за процедурой анализа статистических данных. Кроме того, полученные математические формулы будут справедливы как для дискретных, так и для непрерывных законов распределения.

Ключевые слова: законы распределения, процедура тестирования, формулы, трансформации.

Introduction

It is common knowledge that the mistake in a description and acceptance of the wrong distribution law leads to the great financial expenditure and to the infringement of the production cycle (Fig. 1).

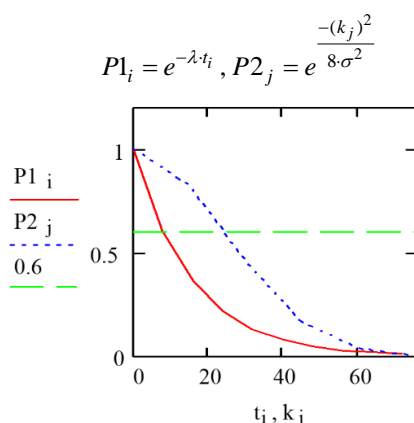


Fig. 1. The two laws of distribution with different survival probability $P1_i$ and $P2_j$ (Два закона распределения с различными вероятностями безотказной работы $P1_i$ и $P2_j$)

The term of operation for the same system will be quite different if one or another law of distribution is taken into account using traditional criteria (for example, χ^2 , $n\omega^2$, λ and others). For this case if the survival probability has the constant meaning 0.6, the

VERIFICATION OF THE STABILITY FOR THE LAWS OF DISTRIBUTION

Voinov K.N.

The effective algorithm is represented here to show how any researcher have to make the control about the next important action: Is the definite used law of distribution right after the made traditional test or not though the all check-up were made correctly using special standard criteria? If the final result is wrong, there is no possibility to suppose that determined law of distribution can be right for the whole general aggregate of the statistical information. This article helps to avoid any rough mistakes in many conclusions during the procedure in the analyses of statistical data. Moreover, received mathematical formulas will be justified both for the discrete and for the continuous distributions.

Keywords: laws of distribution, procedure of testing, formulas, transformations.

first term of operation gives 0.243 only but if it is the second version, the term is corresponded to 24.0! It's the essential difference. But could the received law be extrapolated for the longer term of operation for our system than it was accepted? Or maybe it's true only for definite limits of statistical data. This important task will be theoretically solved for two examples: to the discrete (1) and to the continuous (2) distributions for normal law. In both cases the main parameter (as a criterion will be the coefficient of variation f or v which for the normal distribution must be less than 0.3(3)).

Moreover, $v = f = \sigma / M$, where: σ - the quadratic mean declination; M - is the mathematical expectation.

The analysis of the stability for the discrete law of distribution (1)

Let's N is the initial value of the unregulated statistical information. Then $M = \sum n_i x_i / N$; dispersion $D = \sigma^2 = (\sum n_i (x_i - M)^2) / (N - 1)$, where: x_i - the meaning of the accidental observed magnitude; n_i - the number of cases and $\sum n_i = N$; moreover, $v^2 = f^2 = \sigma^2 / M^2$.

Now let's throw off ΔN from N by accidental way. Then the residual part of the initial statistical data $N_1 = N - \Delta N$. Indexes Δ and 1 have the link only with the parameters connected for ΔN and N_1 .

The next dependence must be obtained:

$$f^2 = \frac{\left(\frac{1}{N-1}\right) \cdot (\Sigma n_i x_i^2 - 2M \Sigma n_i x_i + M^2 \Sigma n_i)}{M^2} =$$

$$= \left(\frac{1}{N-1}\right) \cdot \left(\frac{\Sigma n_i x_i^2}{M^2} - N\right);$$

$$\Sigma n_i x_i^2 = \sigma^2 (N-1) + M^2 N;$$

$$\Sigma \Delta n_i x_i^2 = \sigma_{\Delta}^2 (\Delta N - 1) + M_{\Delta}^2 \Delta N;$$

$$\Sigma (n_i - \Delta n_i) \cdot x_i^2 = \sigma_1^2 (N - \Delta N - 1) + M_1^2 (N - \Delta N);$$

$$M_1 = \left(\frac{1}{N - \Delta N}\right) (NM - \Delta N M_{\Delta}) =$$

$$= \sum \frac{(n_i - \Delta n_i) x_i}{N - \Delta N}.$$

Let's the sign $g = M / M_{\Delta}$. Then

$$f_1^2 = \left(\frac{1}{(N - \Delta N - 1)}\right) \cdot \left(\frac{\Sigma n_i x_i^2}{M_1^2} - \frac{\Sigma \Delta n_i x_i^2}{M_1^2} - (N - \Delta N)\right) =$$

$$= \left(\frac{1}{N - \Delta N - 1}\right) \cdot$$

$$\cdot \left(\left(\frac{(\sigma^2 (N-1) - \sigma_{\Delta}^2 (\Delta N - 1) + M^2 N - M_{\Delta}^2 \Delta N)(N - \Delta N)^2}{(NM - \Delta N M_{\Delta})^2}\right) - (N - \Delta N)\right) =$$

$$= \left(\frac{N - \Delta N}{N - \Delta N - 1}\right) \cdot$$

$$\cdot g^2 \cdot \frac{(f^2 (N-1) - f_{\Delta}^2 g^{-2} (\Delta N - 1) + N - g^{-2} \Delta N)(N - \Delta N) - (gN - \Delta N)^2}{(gN - \Delta N)^2} =$$

$$= \left(\frac{N - \Delta N}{N - \Delta N - 1}\right) \cdot \left(\frac{(N - \Delta N)((N-1) \cdot f^2 g^2 - (\Delta N - 1) f_{\Delta}^2) - N \Delta N (g-1)^2}{(gN - \Delta N)^2}\right) \cdot (1)$$

Having taken the square root from f_1^2 the output will be found. But the all terms in the last formula don't have index 1. So we needn't work with the big part of statistical data to get the final result. If it will be less 0.3(3), the law of distribution is the same. So it's a stable law and the observation for the system can be stopped.

Analogously the next results can be obtained to coefficient of asymmetry C_1 and of excess E_1 . For all initial statistical data:

$$C = \frac{\Sigma n_i (x_i - M)^3}{N \sigma^3} =$$

$$= \frac{1}{N \sigma^3} (\Sigma n_i x_i^3 - 3M \sigma^2 (N-1) - M^3 N) =$$

$$= \left(\frac{\Sigma n_i x_i^3}{N \sigma^3}\right) - \left(\frac{3(N-1)}{Nf}\right) - \frac{1}{f^3};$$

$$\frac{\Sigma n_i x_i^3}{N \sigma^3} = C + \frac{3(N-1)}{Nf} + \frac{1}{f^3};$$

$$\frac{\Sigma \Delta n_i x_i^3}{\Delta N \sigma_{\Delta}^3} = C_{\Delta} + \frac{3(\Delta N - 1)}{\Delta N f_{\Delta}} + \frac{1}{f_{\Delta}^3}. \text{ Then}$$

$$C_1 = \frac{\Sigma (n_i - \Delta n_i) (x_i - M_1)^3}{\sigma_1^3 (N - \Delta N)} =$$

$$= \left(\frac{(N - \Delta N)^2}{f_1^3 (gN - \Delta N)^3}\right) \cdot \{g^3 [CNf^3 + 3f^2(N-1) + N] -$$

$$- [C_{\Delta} f_{\Delta}^3 \Delta N + 3(\Delta N - 1) f_{\Delta}^2 + \Delta N]\} -$$

$$\frac{3(N - \Delta N - 1)}{(N - \Delta N) f_1} - \frac{1}{f_1^3}. \quad (2)$$

And for excess:

$$(E_1 + 3)(N - \Delta N) = \left(\frac{1}{(gN - \Delta N)^4 f_1^4}\right) \cdot$$

$$\cdot \{g^4 (E + 3) N f^4 + 4CNf^3 + 6(N-1)f^2 + N -$$

$$- (E_{\Delta} + 3) \Delta N f_{\Delta}^4 + 4C_{\Delta} \Delta N f_{\Delta}^3 + 6(\Delta N - 1) f_{\Delta}^2 + \Delta N\} -$$

$$- \left(\frac{4C_1}{f_1}\right) (N - \Delta N) - \frac{6(N - \Delta N - 1)}{f_1^2} - \frac{N - \Delta N}{f_1^4}. \quad (3)$$

The analysis of the stability for the uninterrupted law of distribution (2)

Now let's get the same formulas as it was for position (1). Namely: MX – is the mathematical expectation; $\sigma^2 = DX$ is dispersion. Then

$$MX = \int_a^b x f(x) dx;$$

$$\sigma^2 = DX = \int_a^b (x - MX)^2 f(x) dx;$$

$$v^2 = f^2 = \frac{\int_a^b (x - MX)^2 f(x) dx}{(MX)^2} =$$

$$\frac{\int_a^b f(x) x^2 dx}{(MX)^2} - 1 = \frac{DX}{(MX)^2};$$

$$\int_a^b f(x) x^2 dx = DX + (MX)^2;$$

$$\int_a^b f_1(x) x^2 dx = D_1 X + (M_1 X)^2;$$

$$\int_a^b f_{\Delta}(x) x^2 dx = D_{\Delta} X + (M_{\Delta} X)^2;$$

$$M_1 X = \int_a^b f(x) x dx - \int_a^b f_{\Delta}(x) x dx;$$

Then

$$\begin{aligned}
 v_1^2 &= f_1^2 = \frac{\int_a^b f_1(x) x^2 dx}{(M_1 X)^2} - 1 = \\
 &= \frac{DX + (MX)^2 - D_{\Delta} X - (M_{\Delta} X)^2 - (MX - M_{\Delta} X)^2}{(MX - M_{\Delta} X)^2} = \\
 &= \frac{(MX)^2 f^2 - (M_{\Delta} X)^2 f_{\Delta}^2 - 2(M_{\Delta} X)^2 + 2MX \cdot M_{\Delta} X}{(MX - M_{\Delta} X)^2} = \\
 &= \frac{\left(\frac{(M_{\Delta} X)^2}{(g-1)^2}\right) \cdot (g^2 f^2 - f_{\Delta}^2 - 2 + 2g)}{(M_{\Delta} X)^2} = \\
 &= \frac{g^2 f^2 - f_{\Delta}^2}{(g-1)^2} + \frac{2}{(g-1)}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

So the final formula is mighty easy to work with it. And else: we needn't calculate the big residual data N_1 .

Now, as in the first example above, analogously the next results can be obtained to coefficients of asymmetry C_1 and of excess E_1 .

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{\int_a^b (x-MX)^3 f(x) dx}{\sigma^3} = \\
 &= \frac{\int_a^b f(x) x^3 dx - 3MX \int_a^b x^2 f(x) dx}{\sigma^3} + \\
 &+ \frac{3(MX)^2 \int_a^b x f(x) dx - (MX)^3 \int_a^b f(x) dx}{\sigma^3} = \\
 &= \frac{\int_a^b f(x) x^3 dx}{\sigma^3} - \frac{3}{f} - \frac{1}{f^3}; \\
 \int_a^b f(x) x^3 dx &= \left(C + \frac{3}{f} + \frac{1}{f^3}\right) \sigma^3; \\
 C_1 &= \frac{\int_a^b f_1(x) (x - M_1 X)^3 dx}{\sigma_1^3} = \\
 &= \frac{\int_a^b (f(x) - f_{\Delta}(x)) x^3 dx}{\sigma_1^3} - \frac{3}{f_1} - \frac{1}{f_1^3} = \\
 &= \frac{\left(C + \frac{3}{f} + \frac{1}{f^3}\right) \sigma^3 - \left(C_{\Delta} + \frac{3}{f_{\Delta}} + \frac{1}{f_{\Delta}^3}\right) \sigma_{\Delta}^3}{\sigma_1^3} - \frac{3}{f_1} - \frac{1}{f_1^3} = (*)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma^3}{\sigma_1^3} &= \frac{f^3}{f_1^3} \cdot \left(\frac{MX}{M_1 X}\right)^3 = \frac{f^3}{f_1^3} \cdot \left(\frac{MX}{MX - M_{\Delta} X}\right)^3 = \\
 &= \frac{f^3 g^3}{f_1^3 (g-1)^3}; \\
 \frac{\sigma_{\Delta}^3}{\sigma_1^3} &= \frac{f_{\Delta}^3}{f_1^3} \cdot \frac{(M_{\Delta} X)^3}{(MX - M_{\Delta} X)^3} = \frac{f_{\Delta}^3}{f_1^3 (g-1)^3}; \\
 \frac{f^3}{f_1^3} \cdot \frac{(MX)^3}{(MX - M_{\Delta} X)^3} &= \frac{f^3}{f_1^3} \cdot \frac{g^3}{(g-1)^3}; \\
 \frac{f_{\Delta}^3}{f_1^3} \cdot \frac{(M_{\Delta} X)^3}{(MX - M_{\Delta} X)^3} &= \frac{f_{\Delta}^3}{f_1^3 (g-1)^3}. \\
 (*) &= \frac{\left(C + \frac{3}{f} + \frac{1}{f^3}\right) f^3 g^3 - \left(C_{\Delta} + \frac{3}{f_{\Delta}} + \frac{1}{f_{\Delta}^3}\right) f_{\Delta}^3}{f_1^3 (g-1)^3} - \frac{3}{f_1} - \frac{1}{f_1^3} = \\
 &= \frac{1}{f_1^3 (g-1)^3} \cdot [g^3 (Cf^3 + 3f^2 + 1) - (C_{\Delta} f_{\Delta}^3 + 3f_{\Delta}^2 + 1)] - \\
 &\quad - \frac{3}{f_1} - \frac{1}{f_1^3}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Because the meaning for f_1 is determined above, so the task is solved too.

Conclusions

1) By means of artificial elimination some amount of statistical data from initial information and using traditional criteria to check the model of distribution law the researcher can not only find is this law a stable, but can get the response about possibility to do the extrapolation conclusions on the further term of operation for elements in locomotives, cars and others systems.

2) Another recommendation is the next: the share of consistent elimination must be approximately 20, 40 and 60 % from the initial value of the statistical data. If in the first case the law of distribution will be the same (as for the all initial information), it means that the stability is not high and extrapolation of conclusions for reliability of definite parts mustn't be made for the future period of operation for the system. In the second case the decision for the extrapolation of conclusion has a chance about 50:50. And at last at the third case any researcher can stop the observations for the system and calculation, because the law of distribution has a stability in full, and do the extrapolation for conclusions about the reliability. Earlier well-known methods of calculations were not effective than those which are given in here.

3) Suggested procedure works good if N is usually more than 20. If it will be less than 20 the researcher

can use another standard method – a priori empirical functions.

4) Suggested methods are really very important in practice [1, 2, 3, 5] and can be added the next author's work [4] where is given addition effective method for calculation the confiding probability if a researcher takes only 3 or 5 statistical data by the casual way from the whole general aggregate [4].

[1] Войнов К.Н. Прогнозирование надёжности механических систем. //Л., «Машиностроение». – 1978. – 208 с.

[2] Войнов К.Н. Надёжность вагонов. // М., «Транспорт». – 1989. – 112 с.

[3] Войнов К.Н. Трибология и робототехника: в вопросах и ответах. //СПб., ИГУПС. – 2007. – 136 с.

[4] Voinov Kirill. Promising Estimations in the Statistical information about the Technical Investigations. В P International. India & United Kingdom. First Edition. – 2021. – 59 с.

[5] Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. //М.: Наука. – 1977. – 344 с.

ВЛИЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРОЦЕСС СВЕРЛЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Волосова М.А., Федоров С.В. *, Тет У, Колосова Н.В.

*E-mail: sv.fedorov@icloud.com

ФБГОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия.

При сверлении титановых сплавов из-за их низкой теплопроводности расширение металла приводит к давлению на инструмент. При этом сила теплового источника во время формообразования во многом зависит от сил трения на рабочих поверхностях инструмента, а эффективность нанесения нитридного износостойкого покрытия будет в значительной степени зависеть от способности уменьшить фрикционное взаимодействие на контактных площадках. Здесь некоторую помощь могут оказать дополнительные антифрикционные покрытия, которые можно наносить различными способами. В работе исследовано влияние CVD DLC покрытия и технологии эпиламирования на силу резания и геометрические характеристики полученных отверстий.

Ключевые слова: титановый сплав, сверление, антифрикционные покрытия.

Введение

Среди проблем, возникающих при обработке титановых сплавов, в частности, при сверлении, дополнительные трудности связаны с их низкой теплопроводностью. Поскольку тепло, выделяющееся в процессе резки, распределяется по заготовке довольно медленно, расширение металла приводит к существенному давлению на инструмент. К нему активно прилипает стружка, увеличивается коэффициент трения, выделяется дополнительное тепло. Высокая температура и ее неблагоприятное распределение в режущем

THE EFFECT OF ANTIFRICTION COATINGS ON THE DRILLING PROCESS OF TITANIUM ALLOY

Volosova M.A., Fedorov S.V., Thet Oo, Kolosova N.V.

The expansion of the metal leads to pressure on the tool when drilling titanium alloys due to their low thermal conductivity. At the same time, the strength of the heat source during shaping largely depends on the friction forces on the working surfaces of the tool, and the effectiveness of applying a nitride wear-resistant coating will largely depend on the ability to reduce frictional interaction on the contact pads. Additional antifriction coatings, which can be applied in various ways, can provide some help here. The paper investigates the effect of PVD DLC coating and epilaming technology on the cutting force and geometric characteristics of the resulting holes.

Keywords: titanium alloy, drilling, anti-friction coatings.

инструменте значительно сокращают время резания до замены инструмента.

Для повышения износостойкости инструмента повсеместно и довольно успешно используются износостойкие покрытия. Более того, современные покрытия можно рассматривать как износостойкие комплексы, разработанные с учетом условий работы. Трех-пятикратный эффект увеличения долговечности при обработке углеродистых сталей уже стал нормой. Однако при обработке титановых сплавов увеличение стойкости уже на 50-70% можно считать успехом.

Из классических работ в области теории резания материалов известно, что сила теплового источника во время формообразования во многом зависят от сил трения на рабочих поверхностях инструмента. Следовательно, эффективность их нанесения будет в значительной степени зависеть от способности уменьшить фрикционное взаимодействие на контактных площадках, конечно, при сохранении термостойкости. Здесь некоторую помощь могут оказать дополнительные антифрикционные покрытия, которые можно наносить различными способами [1,2].

Алмазоподобные углеродные покрытия (DLC) имеют явные преимущества перед нитридными и оксидными покрытиями в условия обеспечения пониженного коэффициента трения на рабочих поверхностях инструмента. Но следует учитывать, что применение DLC покрытий для режущего инструмента в условиях обработки труднообрабатываемых сплавов ограничено их относительно низкой термостойкостью. Тем не менее современные DLC-покрытия остаются недооцененными, у них есть определенные перспективы в повышении режущей способности инструмента при резании титановых сплавов.

Еще одним интересным способом уменьшения трения является технология эпиламирования, которая основана на использовании поверхностно-активных веществ во фторуглеродных легко испаряющихся растворителях. Такие растворы наносятся на поверхность инструмента и после испарения образуют тонкую пленку толщиной до 100 нм. Современные составы вполне способны работать в зоне достаточно высоких температур.

Новые экспериментальные результаты по оценке влияния антифрикционных покрытий на точность отверстий и шероховатость поверхности обрабатываемой детали могут стать шагом к расширению областей их технологического применения и внедрения на основе новых технических решений.

Материалы и методы

В качестве обрабатываемой заготовки использовалась пластина из высокопрочного титанового сплава BT18Y толщиной 15 мм. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Испытывалась партия сверл короткой серии с длиной режущей части 25 мм диаметром 8,7 мм ($2\varphi = 118^\circ$, $\omega = 30^\circ$) из твердого сплава KFM39 с содержанием Co 9% (Konrad micro drill, Германия) (Рис. 1), на которые были нанесены на установке Platit $\pi 311$ +DLC нитридные износостойкие покрытия с различным содержанием хрома и

Табл. 1. Состав сплава BT18Y

Si	Al	Mo	Sn	Nb	Zr	Ti
0,2	7,1	0,7	2,5	1,1	4,0	основа



Рис. 1. Сверло

титана: TiN, (CrAlSi)N, (CrAlSi)N+(TiCr)N, (TiAlSi)N, (TiCr)N толщиной 4 мкм. На часть сверл было нанесено DLC покрытие CVD методом в атмосфере ацетилена с добавлением тетраметилсилана толщиной 2 мкм. Часть сверл была подвергнута процедуре эпиламирования в кипящей композиции 6SFC-180-05 при температуре 55 °С в течение 40 минут.

Сверление производилось на фрезерном станке KNUTH WF-1 (режим резания: 2000 об/мин, подача 53 мм/мин) с использованием динамометра Kistler (Швейцария) с применением СОЖ. Для измерения характеристик полученных отверстий (диаметр, нецилиндричность, шероховатость) использовались координатно-измерительная машина GLOBAL (Италия) с разрешением 1,7 мкм и прибор для измерения параметров шероховатости и профиля HommelTester T8000 (США). Радиус округления режущей кромки контролировался на приборе MicroCad lite (GFM, Германия).

Результаты и обсуждение

По причине слабой теплопроводности титана из-за нагрева заготовки диаметр обрабатываемого отверстия немного уменьшается и прихватывает инструмент. Вследствие этого в первую очередь страдает ленточка, на которой образуются многочисленные налипы. В зависимости от состава покрытия интенсивность налипания меняется. На рис. 2 можно увидеть характерные фотографии.

Измерение силы резания показывает тенденцию к ее некоторому увеличению, на сверлах с покрытиями. Особенно эффект заметен для покрытий TiN и (TiAlSi)N. Результаты измерения осевой силы представлены на рис. 3. При этом следует заметить, что радиус округления режущей кромки после нанесения покрытия практически не изменился и его значения колебались в пределах 8-11 мкм.

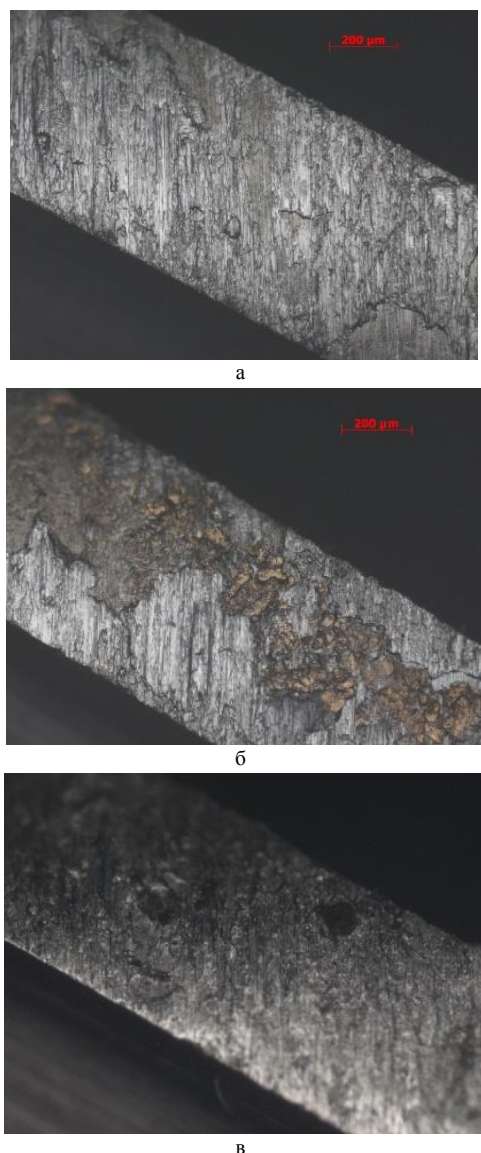


Рис. 2. Налипы титана на ленточке сверла; а) исходное сверло без обработки, б) покрытие TiN+DLC, в) покрытие (TiAlSi)+6SFC

Видно, что нанесение антифрикционной составляющей покрытия также влияет на осевую силу. Причем для различных покрытий это влияние отличается. Например, в случае покрытия (TiCr)N сила существенно возрастает, а в случае (CrAlSi)N+TiCr)N+6SFC имеет наименьшее значение, сравнимое со значением силы на исходном образце.

Следует заметить, что несмотря на снижение коэффициента трения на поверхности сверла с 0,4-0,7 для исходного состояния и после нанесения нитридных покрытий до 0,15-0,3 после нанесения антифрикционной составляющей покрытия, количество налипшего титана принципиально не изменилось. Образование налипов приводит к образованию на ленточке сверла отрицательного заднего угла и инструмент, по крайней мере по

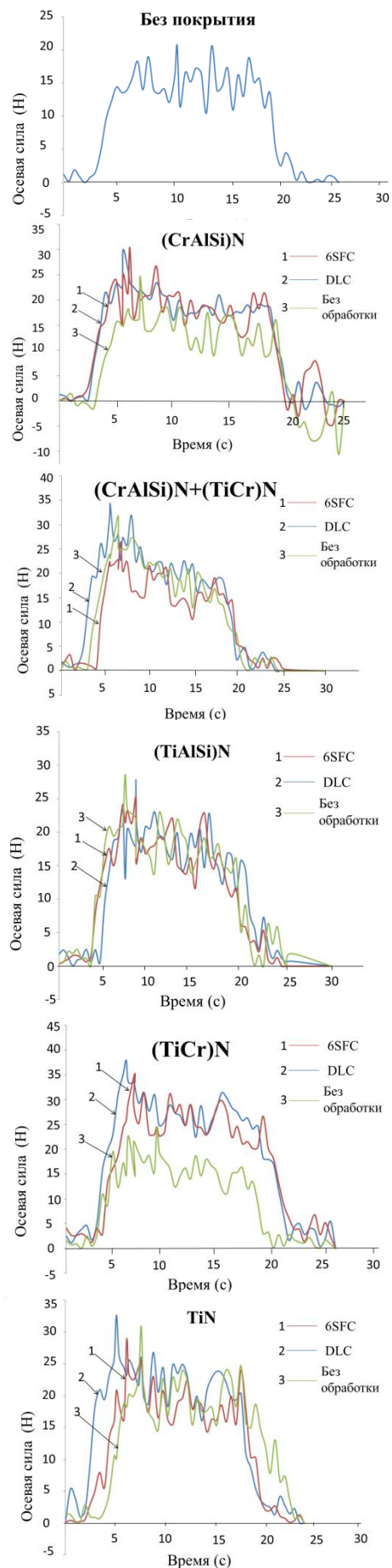


Рис. 3. Значения осевой составляющей силы резания

своей цилиндрической части начинает работать, как дорн. Это приводит к существенному падению шероховатости поверхности в обработанном отверстии и увеличению диаметра отверстия (Табл. 2). Но это является и причиной увеличения осевой силы.

Табл. 2. Параметры отверстий

	Состав покрытия	Ra	Ø	λ/λ_0
1	Без покрытия	2,62	8,699	0,052
2	(CrAlSi)N	1,59	8,720	0,049
3	(CrAlSi)N+DLC	1,86	8,718	0,072
4	(CrAlSi)N+6SFC	1,90	8,723	0,035
5	TiN	1,94	8,720	0,037
6	TiN+DLC	1,66	8,704	0,050
7	TiN+6SFC	1,87	8,734	0,058
8	(TiAlSi)N	1,86	8,717	0,036
9	(TiAlSi)N+DLC	1,86	8,709	0,07
10	(TiAlSi)N+6SFC	1,54	8,714	0,052
11	(CrAlSi)N+TiCr)N	1,81	8,718	0,060
12	(CrAlSi)N+TiCr)N+DLC	1,92	8,735	0,047
13	(CrAlSi)N+TiCr)N+6SFC	1,93	8,723	0,061
14	(TiCr)N	1,80	8,716	0,032
15	(TiCr)N+DLC	2,60	8,712	0,027
16	(TiCr)N+6SFC	2,33	8,726	0,070

Неустойчивая работа сверла, связанная с появлением вибраций, сказывается на нецилиндричности отверстий. Но отклонение носит скорее случайный характер и здесь сложно выделить какую-либо зависимость.

Заключение

В этом исследовании изучалось влияние антифрикционной составляющей износостойкого покрытия на допуски по размерам и шероховатость получаемого отверстия и осевую силу резания при сверлении сплава ВТ18У.

Исследовались пять нитридных покрытий с различным содержанием Cr, Ti и Al. В качестве антифрикционной составляющей использовались слои из DLC и эпилама 6SFC-180-05.

Отмечена тенденция к повышению осевой силы при работе со сверлами с износостойкими покрытиями. Это может быть связано с интенсивным налипанием титана на ленточку сверла, которое приводит к деформации поверхности обрабатываемого отверстия и увеличению его диаметра до 0,03 мм.

Поведение антифрикционных покрытий в этих условиях признано неоднозначным, но тем не менее следует отметить, что применение покрытий на основе (TiAlSi)N с обоими антифрикционными составляющими дало лучший результат.

Настоящие исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках задания в сфере научной деятельности (проект № 0707-2020-0025).

Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инжиниринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013).

[1] Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровтий для применения в инструментальном производстве // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 6 (66). – С. 37-42.

[2] Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Sitnikov N.N., Batako A.D. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coatings and their influence on cutting tool life // Wear. – 2017. – Т. 390-391. – С. 209-219.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ

Гадолина И.В. *, Пугачев М.С.

*E-mail: gadolina@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия.

Рассмотрены задачи контроля качества поверхности с применением новых подходов, в частности, для 3Д печати. 3Д печать, найдя широкое применение в изготовлении сувениров и игрушек, уверенно движется в направлении инженерных и медицинских приложений. При этом в силу особенностей данной технологии, обязательным элементом становится оптимизация производства с целью обеспечения качества поверхности.

Ключевые слова: чистота поверхности, промышленная томография, 3Д печать.

Введение

В связи с острой потребностью в оптимизации параметров печатных деталей аддитивного производства (АП) для удовлетворения требований приложений, выходящих за рамки прототипирования (а именно, в деталях машин под нагрузкой, а также продукции для стоматологической промышленности), необходимо оптимизировать технологию. Требования к качеству включают (но не ограничиваются) высоким качеством поверхности, прочностью, жесткостью, сопротивлением усталости. Для выполнения этих требований целесообразно применять, в частности, методы планирования эксперимента. В статье приведены некоторые экспериментальные данные и результаты, а также анализ литературы для целей исследования.

В [1] был проведен регрессионный анализ по результатам оптимального эксперимента по влиянию некоторых факторов при обработке металлов резанием, а именно: x_1 , x_2 and x_3 , которые являются нормализованными переменными, представляющими: скорость резания (V_c в m/min), подача (F в mm/rev) и глубина резания (d в mm) на чистоту поверхности, выраженной в Ra. Указанные переменные были выбраны как вносящие существенный вклад на отклик, а именно, чистоту поверхности. При этом не были рассмотрены такие функции, как производительность и экономический

NEW APPROACHES IN THE PROBLEM OF ENSURING THE SURFACE QUALITY OF GOODS

Gadolina I.V., Pugachev M.S.

The problems of surface quality control with the use of new approaches, in particular, for 3D printing, are considered. 3D printing, having found wide application in the manufacture of souvenirs and toys, is confidently moving in the direction of engineering and medical applications. At the same time, due to the peculiarities of this technology, optimization of production in order to ensure the quality of the surface becomes an obligatory element.

Keywords: surface cleanliness, productive tomography, 3D printing.

эффект. Было замечено, что переменные подачи F и глубины резания d отрицательно влияют на среднее значение шероховатости поверхности Ra, поскольку увеличение любой из двух указанных переменных означает увеличение параметра шероховатости. С другой стороны, существует оптимальное значение скорости резания, обеспечивающее минимальное значение шероховатости поверхности.

В исследовании [1] использовалась полиномиальная модель второго порядка:

$$Ra = 0,93951 - 0,098879x_1 + 0,54437x_2 + 0,42488x_3 + 0,16653x_1^2 + 0,14916x_3^2 + 0,21732x_2x_3$$

Статистика R-квадрат показывает, что полиномиальная модель второго порядка объясняет 91,774% изменчивости Ra. Полиномиальная модель позволила исследователям [1] установить оптимальную скорость резания, при которой шероховатость поверхности минимальна.

Управление процессом 3Д печати для изделий зубоорудной промышленности также было исследовано с помощью математических методов планирования эксперимента в [2]. В случае аддитивных технологий, к которым можно отнести 3Д печать вопросы рассеивания характеристик, встают особенно остро. При этом некоторые факторы поддаются управлению. В связи с этим планирование эксперимента становится все более актуальным.

В профессиональном языке авиастроителей есть фразеологизм «buy-to-fly ratio», который можно перевести как «отношение того, что вы купили, к тому, что улетело», т. е. сколько материала было куплено и сколько реально «полетело», а именно, реальный вес готового самолета. По разным данным, это соотношение составляет 15:1 или даже 20:1 для сложных деталей. Использование АП и 3Д-печати позволяет уменьшить этот показатель до 1,5 – 2,0:1. В связи с этим планирование эксперимента в 3Д печати дважды экологично: экономит материал за счет 3Д печати и экономит образцы за счет оптимального планирования эксперимента [3].

Одним из современных методов аддитивных технологий является метод моделирования наплавлением (FDM), который выполняется с помощью 3Д-принтера [4]. Основным рабочим элементом такого принтера является экструдер, который подает свариваемый материал на нагреватель и сопло; обычно они представляют одну единицу. Основные элементы 3Д-принтера — это рабочий стол с подогревом и механизм перемещения экструдера по рабочему столу. Изготовление изделия по технологии FDM осуществляется внутри изолированной камеры, в которой поддерживается температура воздуха в пределах 100 °С. Данная технология позволяет получать изделия без значительных остаточных напряжений и с высокой прочностью сцепления слоев. Обратной стороной данной перспективной технологии является зачастую невысокое качество поверхности, что не может не досаждать в особенности профессионалам в области стоматологии.

Специалисты, только приступающие к 3Д печати могут задуматься, насколько крута их кривая обучения (рис. 1), или конкретно в какой части данной кривой они находятся. Кривая обучаемости (англ. learning curve) — графическое представление изменения скорости обучения определенному знанию или виду деятельности. Соответствует Логистическому уравнению, также известному как уравнение Ферхюльста [5]. Точным решением дифференциального уравнения является S-образная логистическая кривая вида

$$P(t) = \frac{K P_0 e^{rt}}{K + P_0 (e^{rt} - 1)} \quad (1)$$

На графике на Рис. 1 показана логистическая кривая с параметрами $K = 1$, $P_0 = 0,5$, $r = 1$. Как правило, способность сохранять в памяти новую информацию максимальна после первых попыток освоения данной деятельности (старт), затем скорость обучения постепенно снижается

(замедление), что означает необходимость большего числа повторений для усвоения материала. Кривая обучаемости также иллюстрирует изначальную сложность изучения чего-либо, а также то, насколько много предстоит освоить после начального ознакомления.

От этого зависит, насколько быстро исследователям, работающим с 3Д принтерами, следует ожидать отдачи. Насколько крута кривая обучения? В какой части кривой они находятся? Старт, замедление, крутое восхождение (см. рис. 1)? Следует ли вам создавать обслуживать и изучать самую сложную САПР-программу? Возможно, следует приобрести готовую программу для печати.

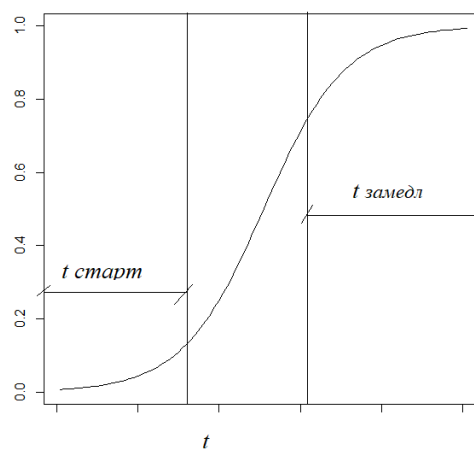


Рис. 1. Кривая обучения (кривая Ферхюльста)

В статье [8] подчеркивается, что недорогие 3Д-принтеры FDM не работают должным образом автоматически, а требуют необходимой фазы калибровки, поскольку оптимальные настройки конфигурации в программном обеспечении для разбиения 3Д-модели на слои неизвестны, а количество значений параметров, которые необходимо определить вручную, является значительным.

В [9] сформулирована проблема качества продукции АП. Авторы обсудили методы химической постобработки, применяемые к деталям из ABS-пластика, изготовленным методом FDM, которые, как известно, увеличивают шероховатость поверхности, неточность размеров и (star case effect) эффект лестницы. Все эти проблемы связаны с поверхностью. В конечном итоге, они не позволяют деталям стать конечным продуктом. Очевидно, что для получения готовых к использованию деталей необходимы операции постобработки. Авторы обсуждают методы постобработки и разделяют их на химическую постобработку, операции механической постобработки и операции термической постобработки. Зачастую требования заказчиков противоречивы. В [9] подчеркивается

важность низкой шероховатости поверхности (особенно в стоматологии). Однако поиски показали, что улучшение качества поверхности иногда отрицательно коррелирует с прочностными характеристиками. Трудно сказать, означает ли эта корреляция причинно-следственную связь.

Материалы и методы

Ранее авторы данной статьи уже работали над проблемой оптимизации 3Д печати для улучшения прочностных характеристик [4, 8]. В настоящей статье упор сделан на оптимизацию качества поверхности.

В работе [9] подчеркивается фрактальный характер понятия поверхность. Авторы [9] отмечают, что проблемы поверхности имеют давнюю историю, но они обретают особую актуальность в связи с развитием нанотехнологий. для которых шероховатость является свойством самой структуры. Рассматриваются математические и физические фракталы, при этом для физических фракталов число итераций конечно, в отличие от математических.

Перспективным представляется использование современных методов анализа качества поверхности, а именно промышленной томографии и последующей компьютерной обработкой томографических изображений. Хотя данный метод предполагает: в основном исследование образцов по объёму, часть предоставленных после исследования образцов из полимерных композитных материалов (ПКМ) изображений вполне может служить для целей анализа поверхности. Изначально исследование было спланировано для анализа степени поврежденности цензурированных (т.е. снятых с испытаний по достижении базы усталостных испытаний) образцов из ПКМ. На рис. 2 приведено объемное изображение рабочей части образца, снятого с усталостных испытаний по достижении базы испытаний (цензурированный образец). Видны пустоты и жертвенный (технологический) слой.

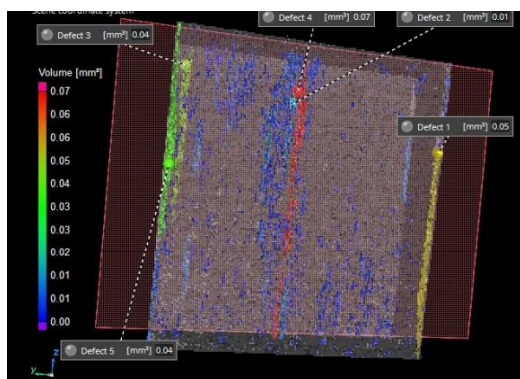


Рис. 2. Объемное изображение образца из ПКМ, выполненное на промышленном томографе

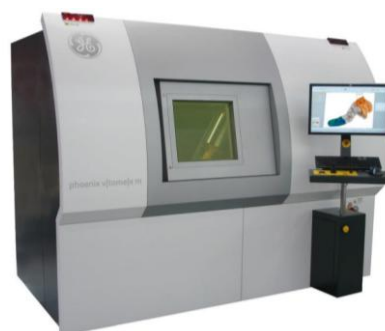


Рис. 3. Общий вид метрологического промышленного томографа WG v|tome|x m300

Общепринятыми показателями качества поверхности являются осредненные показатели неровностей Ra и Rz [10] имеют каждый свои специфические области применения в зависимости от класса механической обработки. Схема, поясняющая определение Ra приведена на рис. 4.

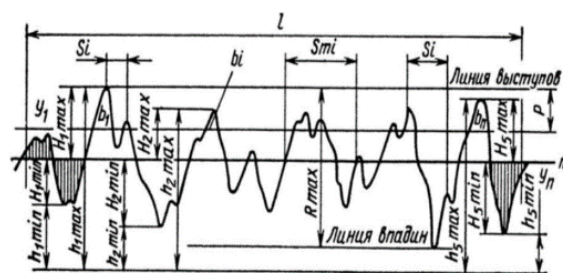


Рис. 4. Пример профилограммы с пояснением определения Ra. m – средняя линия

На наш взгляд недостатком показателей Ra и Rz является их интегральный (усредненный) характер. Поскольку на характеристики работы сопряжения могут влиять не только локальные экстремумы, зафиксированные при контроле поверхности, но и огибающие циклы, нами предложена концепция обработки записи неровностей по аналогии с методом «дождя», применяемым для обработки случайных процессов нагружения [11, 12]. Смысл метода дождя заключается в сохранении мелких пиков плюс учет огибающих циклов, определяемых по специальным правилам. На гистограмме (рис. 5) и в таблице 1 содержатся данные о распределении случайной величины неровностей ra , определенной по аналогии с распределением амплитуд падающего дождя для примера, показанного на рис. 4.

Из Таблицы 1 видно, что вариация случайной величины ra весьма велика ($V(ra) = sd/mean = 1.06$).

В ИМАШ РАН были проведены исследования по анализу факторов, влияющих на качество поверхности 3Д печати при печати на принтере XXXX. Наиболее важные факторы показаны в таблице 2.

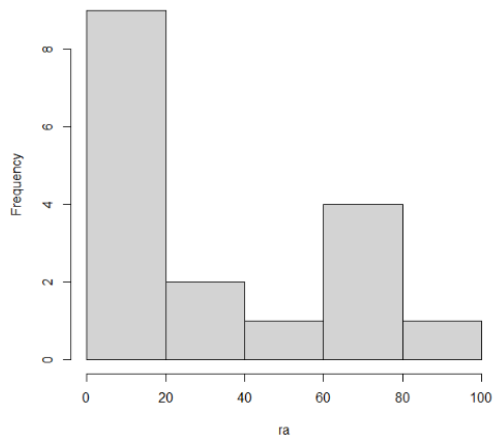


Рис. 5. Гистограмма распределения случайной величины неровностей, выделенных по методу «дождя» для примера показанного на рис. 4

Табл. 1. Сводка по случайной величине ra для примера неровностей, показанного на рис. 2

Min	1-st Q	median	mean	3-rd Q	Sd	max
1	4,75	16	26,67	44,5	28,2	76,5

Табл. 2. Влияющие факторы в 3D-печати

Предустановленные факторы:	
1	Температура печати
2	Скорость нанесения слоя 30 мм/с
3	Диаметр сопла 0,5 мм
4	Размер нити накаливания 1,75 мм
Анализируемый фактор (нерегулируемый):	
Тип пластика: Серый/Белый	Тип пластика: Серый/Белый
Факторы, которые варьировались в эксперименте:	
Скорость подачи 0,015; 0,03; 0,06; 0,04; 0,15мм/с (в зависимости от основания)	Скорость подачи 0,015; 0,03; 0,06; 0,04; 0,15мм/с (в зависимости от основания)
Базовая длина	180, 100, 70, 40, 10 мм

Результаты и обсуждение

3D печать, как перспективная технология, требует освоения новых знаний в области программирования и материалов. Важно оценить, на каком этапе находится уровень освоения (старт, интенсивное развитие, замедление). При этом даже при наличии перспективного программного и печатающего оборудования возможны проблемы с качеством поверхности изделий, что является неприемлемым в некоторых областях использования (например, при изготовлении зубных протезов).

Методы планирования эксперимента, направленные на оптимизацию 3D печати, могут позволить использовать имеющиеся ресурсы по управлению параметрами в доступных интервалах для улучшения качества поверхности.

Для более полного учета отклонения поверхности введен новый параметр ra , сконструированный по аналогии с методом дождя для обработки случайных процессов нагружения.

Данный параметр позволит: 1. Использовать распределение случайной величины вместо интегральной характеристики; 2. Учесть огибающую по неровностям.

Заключение

Новые подходы, рассмотренные в статье, позволят наметить пути к улучшению качества поверхности машиностроительных изделий, тем самым способствуя повышению плавности и долговечности работы трибосопряжений.

Предложено, в частности, использовать распределение огибающих циклов неровностей для характеристики поверхности. Данный показатель нуждается в дальнейшей проработке и сопоставлении с имеющимися методиками.

При выполнении эксперимента использовалось принтер 3D System Cubex duo.

Авторы статьи выражают благодарность нашим коллегам из ООО «Остек-СМТ» Нисану А.В. и Копытову В.А. за проведенное томографическое исследование образцов из полимерных композитов.

- [1] Arbizu I.P., Perez C.J.L. Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes //Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Т. 143. – С. 390-396.
- [2] Arnold C. et al. Surface quality of 3D-printed models as a function of various printing parameters //Materials. – 2019. – Т. 12. – №. 12. – С. 1970.
- [3] Адлер, Ю.П. Введение в планирование экспериментов: учебное пособие / Ю.П. Адлер. – Москва. ИД МИСиС, – 2014. – 36 с.
- [4] Наумов О.В., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Поляков А.Н. Исследование деформационно-прочностных свойств АБС пластика при печати деталей на 3d принтере // В сборнике МИКМУС - 2016: сборник трудов конференции. – Москва, – 2017. – С. 57-60.
- [5] Verhulst P. F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement //Corresp. Math. Phys. – 1838. – Т. 10. – С. 113-126.
- [6] Cappetti N., Naddeo A., Salerno G. Influence of Control Parameters on Consumer FDM 3D Printing //Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0. – IOS Press, 2018. – С. 165-177. doi: 10.3233/978-1-61499-898-3-165
- [7] Sunay N., Mert K., Kaynak Y. Chemical post-processing methods for enhancing surface properties of parts fabricated by additive manufacturing: a review //Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences. – 2020. – Т. 38. – №. 4. – С. 2027-2042.
- [8] Gadolina I.V., Pugachev M.S. Preliminarni koraci planiranja eksperimenata u aditivnim tehnologijama/Integritet i vek konstrukcija. – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 19-23.
- [9] Бавыкин О.Б., Вячеславава О.Ф. Фрактальный анализ поверхностного слоя материала – М.: Нобель пресс – 2013. – 110 с.
- [10] ГОСТ 2789 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
- [11] Matsuishi M., Endo T. Fatigue of metals subjected to varying stress //Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan. – 1968. – Т. 68. – №. 2. – С. 37-40.
- [12] ГОСТ 25.101-83 Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЯ TiN ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

¹Газизова М.Ю. *, ²Смирнов Н.А., ²Кудряшов С.И., ³Шугуров В.В., ³Ахмадеев Ю.Х.

*E-mail: SmolyakovaMarina@mail.ru

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия;

²Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия;

³Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.

Исследовано влияние фемтосекундной лазерной обработки (ФЛО) поверхности покрытия нитрида титана TiN на его адгезионную прочность. Изучено влияния энергии ФЛО и направления сканирования на критическую нагрузку, при которой происходит полное разрушение покрытия. Показано, что сформированные структуры, которые имеют минимальные значение коэффициента трения при трибологических испытаниях в условиях трения со смазкой, имеют более высокую адгезию.

Ключевые слова: адгезия, коэффициент трения, нитрид титана, LIPSS, структурирование поверхности, покрытия

Введение

Одной из основных проблем современной трибологии является получение низких и сверхнизких коэффициентов трения. Анализ потерь на преодоление трения показал возможность существенного увеличения производительности узлов трения только за счет снижения коэффициента трения. По оценкам Кеннета Хольмерга с соавторами на сегодняшний день затраты, связанные с процессами изнашивания ничтожны (~3%) [1]. Главная проблема современного производства и промышленности – это высокие значения коэффициента трения. Известно, что около 30% от общего потребления энергоресурсов в мире приходится на преодоление трения [1, 2].

Поиски новых путей снижения трения привели к развитию такого направления в трибологии, как снижение коэффициента трения за счет структурирования поверхности, создания определенных структур с заданным уровнем шероховатости, периодичности и распределения. Наибольшую популярность среди способов структурирования поверхностей показали лазерные технологии. На основе лазерного излучения нано- или фемтосекундной длительности были разработаны коммерчески доступные методы текстурирования, которые возможно применять для

ADHESION OF COATING TiN AFTER EXPOSURE TO ULTRASHORT LASER PULSES Gazizova M.Yu., Smirnov N.A, Kudryashov S.I., Shugurov V.V., Achmadeev Y.H.

The effect of femtosecond laser irradiation (FLI) of the surface of a coating of titanium nitride TiN on its adhesive strength has been studied. The effect of the FLI energy and the scanning direction to be is completely destroyed has been studied. It is shown that the obtained structures, with the minimum value of the friction coefficient during tribological tests under conditions of friction with lubrication have higher adhesion.

Keywords: adhesion, friction coefficient, titanium nitride, LIPSS, surface structuring, coatings.

различных классов материалов (металлы, керамика, полиэтилен и др.) [3]. Особый интерес данного подхода вызван возможностью модификации труднообрабатываемых покрытий, нанесение которых ранее считалось заключительным этапом обработки.

Напримере широкоиспользуемого покрытия нитрида титана TiN, Бонзе Дж. с соавторами одними из первых продемонстрировали возможность снижения коэффициента трения за счет структурирования поверхности покрытия фемтосекундным лазером [4]. Структурирование покрытия TiN при помощи фемтосекундной лазерной обработки (ФЛО) позволило снизить коэффициент трения от 20% - 33% до 2,5 раз в сравнении с необработанным нитридом титана в зависимости от формируемой структуры и условий испытаний [4-6].

Модификация поверхности покрытий всегда сопряжена с необходимостью контроля адгезионной прочности, как непосредственно самого покрытия к подложке, так и сформированных структур, а также их влияния на всю систему (подложка – покрытие - структурированный слой) в целом. Адгезионная прочность покрытий является важным свойством, определяющим его дальнейшие механические и трибологические характеристики. Исходя из этого, в рамках данной работы были проведены

исследования по изучению влияния ФЛО на адгезионную прочность покрытия TiN.

Материалы и методы

Покрытие нитрида титана наносилось на подложку из технически чистого титана VT1-0 методом вакуумно-дугового осаждения с плазменным ассистированием при помощи автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установки «КВИНТА» [7]. Последующее структурирование поверхности TiN проводилось ультракороткими лазерными импульсами с использованием волоконного иттербиевого лазера, генерирующего ультракороткие лазерные импульсы длительностью ~ 320 фс и длиной волны 1030 нм. С целью выявления оптимальных режимов модификации нитрида титана, с точки зрения трибологических свойств, структурирование поверхности проводилось в зависимости от энергии лазера: 1,5 мкДж, 3,2 мкДж, 6,2 мкДж, и направления сканирования: параллельное и крестообразное [6].

Исследования адгезионной прочности проводились методом скретч-анализа при помощи установки REVETEST (CSM Instruments). Суть метода заключается в создании на поверхности покрытий контролируемой царапины при постоянно возрастающей нагрузке. Индентор, в качестве которого использовался алмазный наконечник типа «Роквелл С» с радиусом закругления 200 мкм, прочерчивает царапину с заданной скоростью движения и нагружения. При определенной критической нагрузке происходит разрушения покрытия. В совокупности с данными коэффициента трения, акустической эмиссией, глубиной проникновения индентора, структурой поверхности царапины, значение критической нагрузки позволяет оценить адгезионные свойства покрытия.

Испытания нитрида титана до и после структурирования поверхности методом ФЛО были проведены при следующих условиях: нагрузка на индентор увеличивалась от 0,9 Н до 50,0 Н со скоростью 1 мм/мин, длина царапины составляла 10 мм. Момент разрушения покрытия фиксировался визуально после испытаний с помощью оптического микроскопа, оборудованного цифровой камерой. Также исследования микроструктуры поверхности царапины проводились на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Quanta 600 FEG.

Результаты и обсуждение

Ранее было показано, что формирование на поверхности TiN лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (LIPSS) позволяет существенно снизить коэффициент

трения при трении в масле и СОЖ в сравнении с необработанным нитридом титана [6, 8].

Анализ зависимости коэффициента трения от прикладываемой нагрузки для покрытия TiN в исходном состоянии показал, что до появления первых трещин на поверхности, значения коэффициента трения являются стабильными и не превышают 0,10. С появлением трещин при нагрузке на индентор $p = 8,2$ Н (рис. 1) наблюдается резкий рост коэффициента трения и при дальнейшем полном разрушении покрытия при $p = 10,3$ Н коэффициент трения возрастает до 0,60 - 0,80. Нестабильные скачкообразные изменения коэффициента трения после $p = 10,3$ Н характерны для фрикционного контакта с титаном и его сплавами. На изображении поверхности царапины при $p = 10,3$ Н наблюдается четкая граница между покрытием и подложкой (рис. 1).

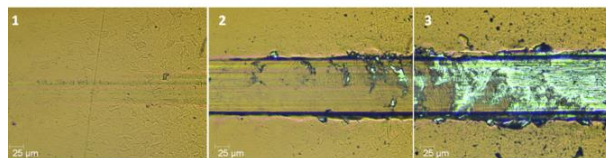
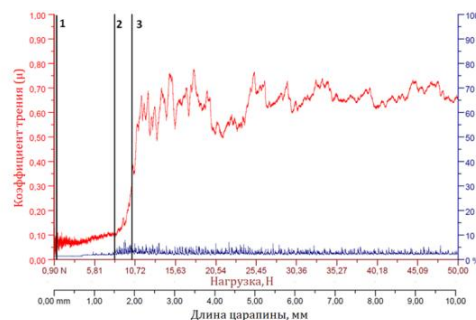


Рис. 1. Изменение коэффициента трения в зависимости от прикладываемой нагрузки и изображения царапины, соответствующие стадиям разрушения для покрытия TiN: 1 – начало испытаний, $p = 1$ Н; 2 – появление первых трещин на поверхности покрытия, $p = 8,2$ Н; 3 – полное разрушение покрытия, $p = 10,3$ Н

Табл. 1. Критическая нагрузка, при которой происходит разрушение покрытия TiN до и после ФЛО с параллельным направлением сканирования (1 – появление первых трещин, 2 – полное разрушение), Н

Стадии разрушения	TiN (исходный)	1,5 мкДж	3,2 мкДж	6,2 мкДж
1	8,2	6,0	5,7	14,7
2	10,3	30,1	14,1	42,9

Табл. 2. Критическая нагрузка, при которой происходит разрушение покрытия TiN до и после ФЛО с крестообразным направлением сканирования (1 – появление первых трещин, 2 – полное разрушение), Н

Стадии разрушения	TiN (исходный)	1,5 мкДж	3,2 мкДж	6,2 мкДж
1	8,2	11,9	4,7	5,1
2	10,3	28,1	27,9	25,2

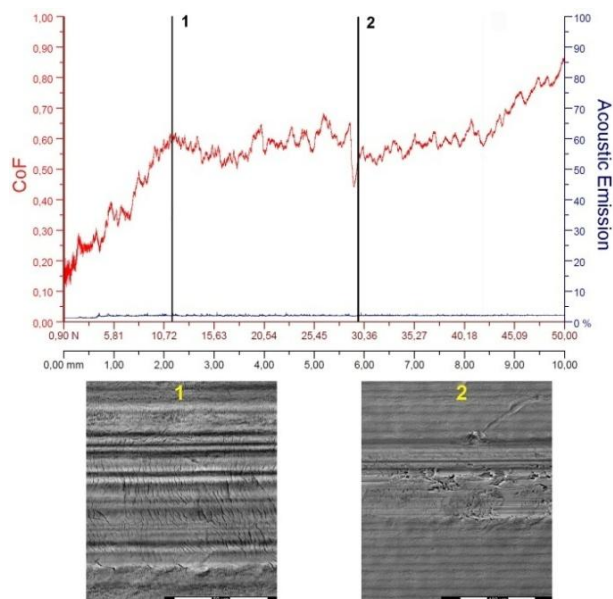


Рис. 2. Изменение коэффициента трения в зависимости от прикладываемой нагрузки и изображения царапины, соответствующие стадиям разрушения для покрытия TiN; 1 – появление первых трещин на структурированной поверхности покрытия, $p = 11,5 \text{ Н}$; 2 – полное разрушение покрытия, $p = 30,1 \text{ Н}$

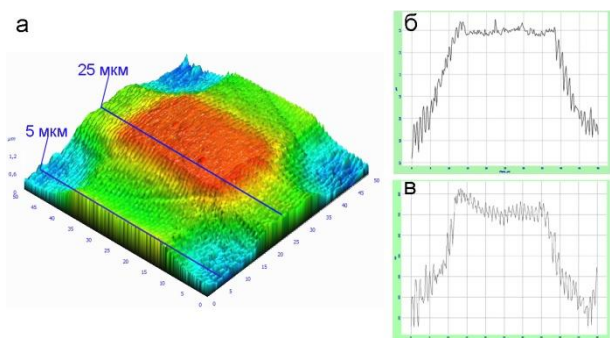


Рис. 3. СЗМ – изображение TiN после ФЛО при энергии лазера 3,2 мкДж с крестообразным направлением сканирования: а) микроструктура поверхности, красная область – необработанный TiN, зеленая область – один проход лазера, голубая область – два прохода лазера; область сканирования 50x50 мкм; б) – в) профиль поперечного сечения LIPSS на расстоянии 25 мкм и 5 мкм соответственно

Создание на нитриде титана периодических поверхностных структур позволяет повысить адгезионную прочность независимо от режима ФЛО (табл. 1 - 2). Так, критическая нагрузка для покрытий после структурирования поверхности возрастает в $\sim 2,5 - 3$ раза при параллельном сканировании поверхности с энергией 1,5 мкДж (табл. 1) и при крестообразном для всех исследуемых энергиях лазера (табл. 2). Необходимо отметить, что в случае параллельной структуры, полученной при энергии лазера 3,2 мкДж существенного повышения критической нагрузки, при которой происходит разрушение покрытия, не наблюдается. Однако, при увеличении энергии до 6,2 мкДж, сформированные структуры разрушились только при нагрузке 42,9 Н (табл. 1). Таким образом,

адгезионная прочность, после модификации по данному режиму возросла в 4 раза.

Более низкие значения адгезионной прочности крестообразных структур в сравнении с параллельными, связаны с наличием не модифицированных участков нитрида титана (рис. 3). Первоначально область контакта приходится на немодифицированные участки нитрида титана. Такие области в первую очередь служат местами зарождения и дальнейшего распространения трещин в структурированную область. Стоит отметить, что коэффициент трения для крестообразных структур при трибологических испытаниях также показал более высокие значения в сравнении с параллельными.

Заключение

Формирование на поверхности покрытия нитрида титана лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (LIPSS) позволяет повысить адгезионную прочность покрытия TiN к подложке. Сравнительный анализ двух типов структур с параллельным и крестообразным направлением сканирования лазера показал, что последние показывают более низкую адгезию, в силу того, что в их структуре присутствуют необработанные участки TiN.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 19-79-00295, с использованием оборудования ЦКП «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ».

- [1] Holmberg K. et al. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions //Friction. – 2017. – V. 5(3). – p. 263-284.
- [2] Holmberg K. et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry //Tribology International. – 2017. – V. 115. – p. 116-139.
- [3] Handbook of laser micro- and nano-engineering. Laser-induced periodic surface structures (LIPSS) / J. Bonse, S.V. Kimer, J. Krüger; Editors K. Sugioka. – Springer Cham, 2021.
- [4] Bonse J. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium nitride coatings for tribological applications//Applied surface science. – 2017. – V. 418. – p. 572-579.
- [5] Stark T. et al. Positive effect of laser structured surfaces on tribological performance //JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2019. – V. 14. – p. 13-18.
- [6] Gazizova M.Yu. et al. The effect of femtosecond laser treatment on the tribological properties of titanium nitride //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 862. – 022054.
- [7] Shugurov V.V. et al. QUINTA equipment for ion-plasma modification of materials and products surface and vacuum arc plasma-assisted deposition of coatings //Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1393. – 012131.
- [8] Gazizova M.Yu. et al. Correlation of the tribological properties of LIPSS on TiN surface with 3D parameters of roughness //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – V. 1014. – 012014.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЯХ СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

¹Гайдар С.М., ¹Ерохин М.Н., ²Наджи Наджм А.Ф., ¹Пикина А.М.*

*E-mail: techmash@rgau-msha.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
г. Москва, Российская Федерация;

²Министерство сельскохозяйственной государственной компании по сельскохозяйственным поставкам,
Багдад, Республика ИРАК.

В поиске новых эффективных путей повышения износостойкости силовых передач и повышения их долговечности предложено устройство для обогащения системы смазки силовых передач легирующими элементами меди. Исследованы трибохимические процессы и осуществлен подбор компонентов смазочной композиции, позволяющий реализовать самоорганизацию избирательного переноса в парах трения «сталь-сталь» с образованием сервоитной пленки. Разработана полезная модель для обогащения масла системы смазки легирующими элементами меди силовой передачи.

Ключевые слова: силовые передачи, износ, смазочные материалы, режим смазки, избирательный перенос, металлоплакирующая присадка, сервоитная пленка, поверхностно-активное вещество.

Введение

Анализ надежности автотракторной техники показывает, что 20...40% отказов приходится на долю агрегатов трансмиссии, работоспособность которых в значительной мере регламентируют зубчатые колеса. Так, при капитальном ремонте из-за износа и усталостного разрушения выбраковывается свыше 60% зубчатых колес [1-2].

Конструктивные и технологические мероприятия, направленные на повышение износостойкости зубчатых передач, в значительной степени исчерпали свои возможности и не обеспечивают необходимого ресурса [4]. В связи с этим актуальное значение приобретает поиск новых эффективных путей решения данной проблемы. Для ее решения необходимо применять высокоэффективные смазочные материалы и уделять внимание режимам смазки [5-7].

USE OF THE SELECTIVE TRANSFER MECHANISM IN MOVABLE COUPLINGS USED IN POWER TRANSMISSIONS OF AGRICULTURAL MACHINES

Gaidar S.M., Erokhin M.N., Najm A.F., Pikina A.M.

Searching for new effective ways of increasing the wear resistance of power transmissions and improving their durability, the authors propose a device for enriching the lubrication system of power transmissions with copper-alloying elements. The tribochemical processes have been studied and the components of the lubricating composition have been selected to provide for the self-organized selective transfer in the "steel-steel" friction couples accompanied by the formation of a servovit film. The authors developed a utility model for enriching the lubricating system oil with copper-alloying elements for power transmission. For testing the effectiveness of the proposed additive and the method of forming the servovit film during operation, a roller test bench was used.

Keywords: power transmissions, wear, lubricants, lubrication mode, selective transfer, cladding additive, servovit film surfactant, chelate complex.

Цель исследования:

повышение долговечности силовых передач за счет реализации механизма избирательного переноса в подвижных сопряжениях при эксплуатации сельскохозяйственных машин.

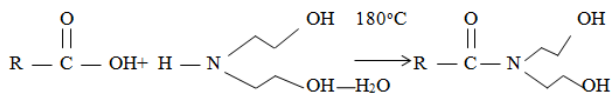
Материалы и методы

Для синтеза поверхностно-активного вещества (ПАВ) была использована магнитная мешалка с подогревом, а также дополнительное оборудование.

Технология получения ПАВ заключается в следующем:

– в колбу (0,5 л) загружают предварительно взвешенные реагенты: 1 моль олеиновой кислоты и 2 моля диэтаноламина;

– включают нагрев и магнитную мешалку, реакция поликонденсации протекает по следующей схеме:



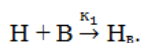
В результате получается амид олеиновой кислоты с выходом продукта 95%. Время реакции 3 часа.

Метод для реализации механизма избирательного переноса в подвижных сопряжениях силовых передач заключается в том, что в поддон картера со смазочным маслом, содержащим ПАВ в качестве присадки, помещается шуп, на котором закреплен объемный полый медный профиль. Хелатный комплекс приобретает зеленый цвет, что указывает на химическую связь медь-азот [5].

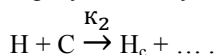
Результаты и обсуждение. Для описания возникновения на поверхностях трения защитной медной пленки рассмотрим компоненты среды, которые могут взаимодействовать с медью или способствовать возникновению ионов меди. В качестве рабочей зоны выбираем плоскопараллельную модель (рис. 1), при которой в поперечном переносе частиц отсутствует вклад гидродинамической составляющей [9].

Для составления кинетических уравнений массопереноса рассмотрим схему взаимодействия элементов системы:

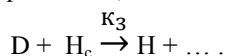
1. Молекулы ПАВ (В), взаимодействуя со свободной поверхностью частиц меди (Н), адсорбируются на ней, образуя покрытие ПАВ (Н_в)



2. Окислитель (С), взаимодействуя с поверхностью частиц меди (Н), образует окисную пленку (Н_с)



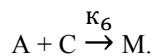
3. Восстановитель (D), взаимодействуя с окисленной поверхностью, восстанавливает ее:



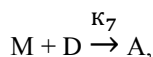
4. В результате поверхностного разупрочнения (эффекта Ребиндера) происходит диспергирование поверхностей Н_в и Н_с, что приводит к выходу молекул окисленной меди (М) и ионов меди (А) под действием электрического поля [6]:



5. Ионы меди при взаимодействии с окислителем образуют молекулы окисленной меди:



6. Молекулы окисленной меди (М), взаимодействуя с восстановителем, восстанавливаются до ионов меди:



где $k_1 \dots k_7$ – константы скоростей соответственно адсорбции ПАВ на медь, окисления, восстановления, выхода ионов меди, выхода окисленной меди, окисления и восстановления ионов меди.

Обозначив переменные концентраций и площадей соответствующими малыми буквами, с учетом диффузии, а также для заряженных ионов меди их дрейфа в электрическом поле, получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} = k_1 h b - k_2 h c + k_3 h_c d, \\ \frac{\partial h_b}{\partial t} = k_1 h b - \bar{k}_4 h_b, \\ \frac{\partial h_c}{\partial t} = k_2 h c - k_3 h_c d - \bar{k}_5 h_c, \\ \frac{\partial b}{\partial t} = D_B \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - k_1 h b, \\ \frac{\partial c}{\partial t} = D_C \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - k_2 h c - k_6 a c, \\ \frac{\partial d}{\partial t} = D_D \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} - k_3 h_c d - k_7 m d, \\ \frac{\partial m}{\partial t} = D_M \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + k_6 a c - k_7 m d + \bar{k}_5 h_c, \\ \frac{\partial a}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial x} \eta E_x a + \bar{k}_4 h_b + k_7 m d - k_6 a c, \end{array} \right. \quad (1)$$

где D_n – коэффициенты диффузии; η – коэффициент подвижности ионов меди; E_x – проекция вектора напряженности электрического поля на ось ОХ.

Электрокинетические явления в зоне трения.

Электрическое поле, возникающее в зоне трения, определяется двумя слагаемыми: полем от граничных поверхностей и полем от зарядов, находящихся в среде. Для определения электрического поля в зазоре сначала найдем поле от границ (что соответствует решению задачи при малых концентрациях зарядов в зоне трения), а затем используем этот результат для постановки граничных условий при решении задачи с произвольной концентрацией зарядов в зоне трения.

Трение при граничной смазке сопровождается поверхностными электрическими явлениями. Одно из них – установление на границе раздела «металл-электролит» гальванопотенциала, вызванного образованием на межфазной границе двойного электрического слоя [7]. Таким образом, поверхность является кусочно-поляризованной.

Процесс плакирования медью подвижных деталей машин и механизмов происходит в результате термической диссоциации медного комплекса на трущихся поверхностях, восстановления ионов меди электронами, поступающих от атомов железа, входящих в состав этих деталей, и последующего осаждения атомов меди на этой поверхности с образованием сервоитной пленки. Все описанные выше реакции протекают в присутствии поверхностно-активного вещества, в роли которого выступает главный

компонент присадки – диэтаноламид олеиновой кислоты, который, выступая в роли лиганда, координируется ионом двухвалентной меди. Признаком образования координационной связи между медью и азотом является окрашивание смазочной смеси в сине-зеленый цвет.

Трибологическая система, работающая в установившемся режиме избирательного переноса, – это многокомпонентная гетерогенная среда, содержащая ионы меди, поверхностно-активные вещества, окислитель, восстановитель, окисленную медь и частицы меди (рис. 1).

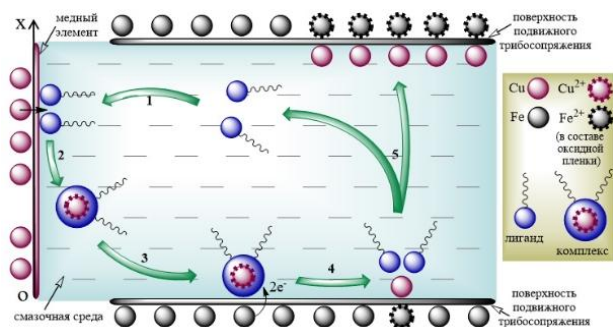


Рис. 1. Плоскопараллельная модель зоны трения в установившемся режиме избирательного переноса:

- 1 – адсорбция молекул лиганда на поверхность меди;
- 2 – образование хелатного комплекса меди; 3 – адсорбция хелатного комплекса меди на поверхность трибосоприжения;
- 4 – трибодеструкция комплекса меди на поверхности сопряжения и восстановление ионов меди; 5 – образование серовитной пленки на поверхностях подвижного сопряжения

Процесс образования серовитной пленки происходит при взаимодействии элементов системы согласно схеме рисунка 1.

В установившемся режиме избирательного переноса восстановление серовитной пленки происходит за счет медьсодержащих компонентов, прежде всего, частиц и ионов меди. И те, и другие стремятся к поверхности, однако, не всякая поверхность может их принять. Существует активная поверхность, способная принимать медьсодержащие компоненты. К ней, прежде всего можно отнести участки трения с нарушенной серовитной пленкой. В реальной паре трения поверхность в любой момент времени состоит из активных и пассивных участков. Таким образом, нулевой поток частиц и ионов меди соответствует распределению у пассивной поверхности. Движение медьсодержащих компонентов начинается не с равномерного их распределения по всей зоне трения, а с распределения равновесного. Это распределение отличается от равномерного тем, что медьсодержащие компоненты распределены в непосредственной близости от поверхности. Их повышенное содержание у возникающей активной

поверхности способствует быстрому восстановлению серовитной пленки.

При взаимодействии поверхностей в парах трения необходимо учитывать факторы, влияющие на возникновение активных поверхностей, адгезионное разрушение и образование активной поверхности основного металла в результате взаимодействия поверхностей трения. При малых нагрузках или относительных скоростях движения поверхностей, площадь активной поверхности может уменьшаться лишь вследствие взаимодействия ее с ПАВ и окислителем, поэтому поток медьсодержащих частиц незначителен, а значит, режим избирательного переноса не может быть устойчивым. При больших нагрузках и относительных скоростях движения поверхностей площадь активной поверхности стремится к максимуму, и для восстановления поверхности необходимо большое количество медьсодержащих компонентов.

В этом случае их поток может уменьшаться вследствие экранирования граничных потенциалов. Если же медьсодержащие компоненты не вводить в большом количестве, то восстановить всю активную поверхность будет нечем, и режим избирательного переноса вновь станет неустойчивым. Таким образом, устойчивость работы пары трения в режиме избирательного переноса определяется состоянием поверхностей трения.

Таким образом, снижение трения и интенсивности изнашивания при установившемся режиме избирательного переноса обеспечивается следующими факторами:

- комплексным взаимодействием компонентов среды;
- наличием граничных условий в виде потенциалов кусочно-поляризованных поверхностей;
- возникновением сил притяжения ионов и частиц меди к поверхностям трения;
- концентрацией медьсодержащих компонентов в граничном слое поверхностей трения;
- образованием активной поверхности достаточной площади;
- взаимодействием компонентов среды с поверхностью.

Для оценки эффективности металлоплакирующей присадки (МПП), в режиме избирательного переноса была использована испытательная установка, предусматривающая синхронное измерение скорости изнашивания и момента сил трения в течение всего опыта без разъединения зоны трения. В качестве смазочной композиции было использовано трансмиссионное масло и металлоплакирующая присадка. Базовое

трансмиссионное масло было использовано как контрольный образец.

Зона трения (испытательный контакт) образована циклическими поверхностями ролика диаметром $70,0 \pm 0,1$ мм из стали 45 (HRC 50) и колодки, прошедшей гомогенизацию, радиусом $35,0 \pm 0,1$ мм, и габаритами (в плане) – 2,01 мм (вдоль скольжения) и 7,27 мм (поперек скольжения), площадь зоны трения составила $0,1461 \text{ см}^2$. Ряд нормальных сил (P): 720; 925; 1130 Н определен экспериментально из условия гарантированного отсутствия признаков заедания.

Частота вращения вала 100 мин^{-1} (линейная скорость – 0,37 м) выбирается экспериментально из условия гарантированного отсутствия гидродинамического режима смазки.

Результаты испытаний представлены на рисунках 2-3.

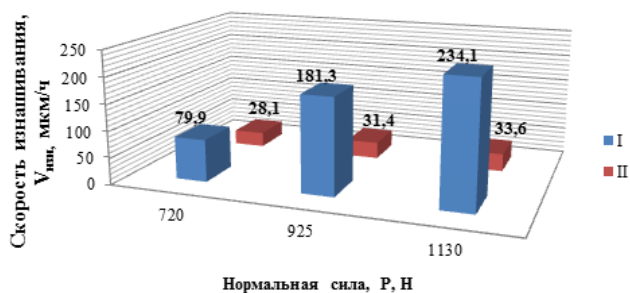


Рис. 2. Значение скорости изнашивания колодки в зависимости от величины нормальной силы при температуре смазочной среды 40 °С:

I – контрольный образец, II – трибосопряжение со смазкой

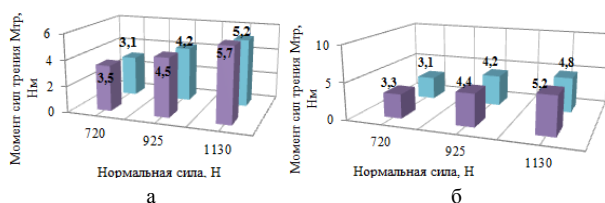


Рис. 3. Зависимость момента сил трения от величины нормальной силы:

I – трибосопряжение со смазкой, II – контрольный образец; а) при температуре смазочной среды 40 °С; б) при температуре смазочной среды 105 °С

Контрольный образец и смазочная композиция, как показали результаты эксперимента, выявили различия по уровню взаимодействия контактов трущихся поверхностей ролика и колодки. Так как металлоплакирующие присадки влияют на трибологические процессы в режиме граничного трения, то, следовательно, наибольший интерес представляет уменьшение износа поверхностей пар трения.

Результаты эксперимента показали, что металлоплакирующая присадка способствует снижению интенсивности износа в диапазоне нормальной силы 720...1130 Н в 2,8...7 раз, а

температура смазочной среды оказывает незначительное влияние. Увеличение нормальной силы незначительно влияет на скорость износа трибосопряжения со смазкой в отличие от контрольного образца (рис. 2). Для момента трения влияние температуры незначительно, как для смазочной композиции, так и для контрольного образца (рис. 3). Смазочная композиция дает положительный эффект уменьшения скорости износа при увеличении температуры до 105 °С, причем износ не увеличивается при увеличении нормальной нагрузки, что нельзя сказать о контрольном образце.

Выводы

1. Представленный способ получения металлоплакирующей присадки легко реализуется в агрегатах трансмиссии, а также исключает седиментационную неустойчивость смазочной композиции.

2. Полученный способ позволил создать устройство для обогащения масла системы смазки легирующими элементами меди в процессе эксплуатации и обеспечить устойчивый и самоорганизующийся режим избирательного переноса.

3. Результаты трибологических исследований показали высокую эффективность металлоплакирующей присадки – интенсивность износа в диапазоне нормальной силы от 720 до 1130 Н снизилась в 2,8...7 раз.

- [1] Сафонов В.В., Азаров А.С. Трибологические свойства модификаций пластичных смазок // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2019. № 4. С. 39-41.
- [2] Ерохин М.Н., Стрельцов В.В. Ресурсосберегающие триботехнологии для снижения износа поверхностей трения деталей // Сборник трудов Транстрибо. Первый Международный симпозиум по транспортной триботехнике. СПб. 2001. С. 27-29.
- [3] Гаркунов Д.Н., Лозовский В.Н. Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирных свойств. А.с. № 115744 СССР.
- [4] Барчан Г.П., Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г. Влияние строения сложных эфиров на процесс избирательного переноса // Химия и технология топлив и масел. 1979. № 7. С. 36-39.
- [5] Барчан Г.П., Чигаренко Г.Г., Пономаренко А.Г. и др. Радикальные процессы при трении в среде сложных эфиров // Трение и износ. 1983. Т.4. №2. С. 194-201.
- [6] Устройство для обогащения масла системы смазки легирующим элементом цветного металла: Патент на полезную модель 206682 U1, 22.09.2021 / С.М. Гайдар, А.Ф. Наджи Наджм, В.Е. Коноплев, Ю.А. Судник, А.М. Пикина. Заявка № 2021115224 от 27.05.2021.
- [7] Литвинов В.Н., Михин Н.М., Мышкин Н.К. Физико-химическая теория избирательного переноса при трении. М.: Наука, 1979. 187 с.
- [8] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов // Грузовик. 2015. № 4. С. 17-29.
- [9] Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Петровская Е.А., Зиятдинов Э.А. Повышение износостойкости узлов трения // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 40-47.

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ КАНАТНЫХ СМАЗОК. СРАВНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ СМАЗАННЫХ ИМПОРТНОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КАНАТНЫМИ СМАЗКАМИ

Головин В.П. *, Крамер О.Л., Шолом В.Ю., Филатов М.В.

*E-mail: rosoil@rosoil.ru

«Технопарк ХТЦ УАИ-Росойл», Уфа, Россия.

В работе приведены результаты сравнительных испытаний износостойкости стальных канатов пропитанных смазками Nyrosten A 19/200 и Росойл-К-110, в условиях, моделирующих различные климатические факторы, характерные для Российской Федерации: низкие температуры, периодическое воздействие пресной или морской воды. Показано, что отечественная смазка не уступает лучшему универсальному зарубежному аналогу по износостойкости.

Ключевые слова: стальные канаты, канатные смазки, износостойкость, пробегная машина, климатические факторы, низкотемпературные свойства, испытания.

Введение

Стальной канат – высокопрочная конструкция, состоящая из множества сплетенных проволок, которая используется в составе различного промышленного и грузоподъемного оборудования – буровых установок, кранов, экскаваторов, лифтов и т.д.

На сегодняшний день в различных областях промышленности применяется множество типов конструкций стального каната, но основным требованием к ним по-прежнему остается прочность, надежность и безопасность в течение всего срока эксплуатации, а задача увеличения ресурса безотказной работы этого ответственного изделия, для конструкторов и технологов остается по-прежнему актуальной [1, 2].

Основным конструктивным элементом, влияющим на долговечность стального каната, является его смазка. Канат подвергается смазке при изготовлении, хранении и эксплуатации. В процессе изготовления смазываются сердечник и отдельные проволоки путем подачи разогретого смазочного материала в конус свивки перед обжимным устройством.

Смазка наружной поверхности каната производится перед намоткой его на приемную бухту. В связи с большим разнообразием внешних условий работы стальных канатов, на

COMPARISON OF WEAR RESISTANCE OF STEEL ROPES IN CONDITIONS OF IMPORT SUBSTITUTION OF ROPE LUBRICANTS

Головин В.П., Крамер О.Л., Шолом В.Ю., Филатов М.В.

The paper presents the results of comparative tests of the wear resistance of steel ropes impregnated with Nyrosten A 19/200 and Rosoil-K-110 lubricants, in conditions simulating various climatic factors characteristic of the Russian Federation: low temperatures, periodic exposure to fresh or sea water. It is shown that the domestic lubricant is not inferior to the universal foreign analogue in terms of wear resistance.

Keywords: steel ropes, rope lubricants, wear resistance, running machine, climatic factors, low temperature properties, tests.

грузоподъемных машинах устанавливаются различные периодичности смазывания канатов и подбираются соответствующие смазочные материалы. При повторной смазке необходимо обеспечить сплошной слой смазочного материала, так как наличие несмазанных мест может вызвать точечную коррозию, что приводит к уменьшению рабочей долговечности каната. Испытания показывают, что срок службы смазанного каната выше, чем несмазанного от 40 до 1000%, в зависимости от условий эксплуатации. [3].

В последние годы увеличилось число машин и оборудования импортного производства, в связи с чем, в обиход потребителей пришли импортные смазочные материалы. В настоящее время во многих областях промышленности актуальным становится импортозамещение, в том числе это касается и канатных смазок.

Поэтому целью данной работы является сравнительный анализ износостойкости стальных канатов, пропитанных канатными смазками Nyrosten, произведенной компанией NYROSTEN Korrosionsschutz GmbH+Co (Германия) и Росойл, произведенной компанией ООО «ХТЦ УАИ» (Россия), при воздействии различных климатических факторов.

Материалы и методы исследования

Для проведения сравнительных испытаний канатных смазок были выбраны: Nyrosten A19/200 произведенной компанией NYROSTEN Korrosionsschutz GmbH+Co (Германия) широко применяемая на российских металлургических предприятиях, производящих стальные канаты и являющаяся наиболее универсальной канатной смазкой применяемой для смазки канатов, эксплуатирующихся в различных климатических условиях, в том числе и в морской воде, а также Росойл-К110, произведенной компанией ООО «ХТЦ УАИ» (Россия) по ТУ 19.20.29-171-63777289-2021, которая разрабатывалась как аналог смазки Nyrosten A19/200.

При проведении испытаний использовался стальной канат марки 5,6-Г-И-Н-Р-1770, изготовленный по ГОСТ 2688-80 «Канаты двойной свивки типа ЛК-Р 6x19(1+6+6/6)+1 о.с. Сортамент». При изготовлении каната его пряди, сердечник, межпрядные и межпроволочные пространства не смазывались и не пропитывались смазочным материалом. Нарезанные из бухты образцы канатов длиной 4,2 метра, пропитывались смазочным материалом методом окунания, при температуре на 20 °С выше температуры каплепадения СМ в течении двух часов с последующей выдержкой на воздухе при температуре 20±5 °С в течении 24 часов.

На первом этапе производились испытания в соответствии с ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость», при скорости вращения барабана 120 колебаний в минуту, обеспечивающий возвратно-поступательные перемещения образца на длине примерно 350 мм (рис. 1). Нагрузка на одну ветвь каната составляла 245 Н. Сменные ролики диаметром 55 мм, обеспечивали изгиб образца на 90°. Диаметр сменных роликов и нагрузка на одну ветвь каната выбирались по ГОСТ 2172-80 «Канаты стальные авиационные. Технические условия».

Поскольку ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость» не устанавливает требования по поддержанию определенного диапазона температуры и влажности окружающего воздуха, испытания проводились в помещении, где температура и относительная влажность в течении суток менялась в диапазоне, соответственно 15-25°С и 20-70%.

Стоит отметить, что данные результаты испытаний не могут отражать реальную картину долговечности стального каната, так как не учитывают внешние температурные или

коррозионно - активные факторы, влияющие на износостойкость каната. Поэтому, на втором и последующих этапах, испытания стальных канатов проводились по разработанному сотрудниками «Технопарка ХТЦ УАИ – Росойл» методу для испытания канатов на выносливость в жидких агрессивных средах, при повышенных или пониженных температурах [4], согласно которому расширяются функциональные возможности испытательной машины и предусматривается проведение испытаний стальных канатов на износостойкость в условиях приближенных к реальным условиям эксплуатации.

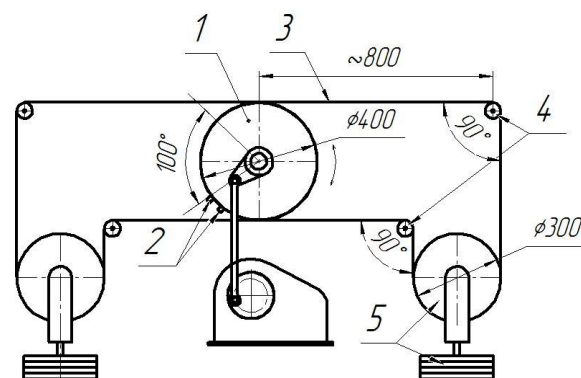


Рис. 1. Схема машины для испытания стальных канатов на выносливость.

1 – ведущий барабан, 2 – зажимы, 3 – испытуемый образец, 4 – сменные ролики, 5 – грузовой ролик с грузом

Результаты испытаний и их обсуждение

Учитывая большой разброс результатов измерений, характерный для усталостных испытаний, испытывались по 15 образцов стального каната с каждым смазочным материалом.

Статистическая обработка результатов испытаний производилась в соответствии с п.4.2 ГОСТ-Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений».

Результаты испытаний стальных канатов на износостойкость по ГОСТ 2387-80 приведены в таблице 1.

Результаты сравнительных испытаний канатов на износостойкость по ГОСТ 2387-80 с периодическим окунанием в коррозионно-активную среду представлены в таблице 2.

Результаты сравнительных испытаний на износостойкость по ГОСТ 2387-80 с периодическим окунанием в коррозионно-активную среду 5% NaCl (имитация морской воды) приведены в таблице 3.

Результаты сравнительных испытаний на износостойкость по ГОСТ 2387-80 в климатической камере при температуре минус (60±2) °С показаны в таблице 4.

Табл. 1. Результаты сравнительных испытаний стального каната на износостойкость по ГОСТ 2387-80

Показатель		Канат без смазки	Канат пропитан Nyrosten A19/200	Канат пропитан Росойл-К-110
Количество изгибов образца до полного разрушения каната	X_{max}	179 753	364 409	345 243
	X_{min}	100 617	188 531	209 206
	\bar{X}	141 089	259 482	274 692
	X_{max}/X_{min}	1,79	1,93	1,65
	$\bar{X}/\bar{X}_{без\ смазки}$	1,00	1,84	1,95
Относительная погрешность результатов измерений, %		9,2	14,2	7,6
Результат испытаний (истинное значение)		141 000 ± 13 000	259 000 ± 37 000	275 000 ± 21 000

Табл. 2. Результаты сравнительных испытаний на износостойкость по ГОСТ 2387-80 с периодическим окунанием в коррозионно активную среду (вода питьевая водопроводная)

Показатель		Канат без смазки	Канат пропитан Nyrosten A19/200	Канат пропитан Росойл-К-110
Количество изгибов образца до полного разрушения каната	X_{max}	47827	75692	91575
	X_{min}	40493	62735	62410
	\bar{X}	43839	68602	75339
	X_{max}/X_{min}	1,18	1,21	1,47
	$\bar{X}/\bar{X}_{без\ смазки}$	1,00	1,56	1,72
Относительная погрешность результатов измерений, %		2,1	4,3	5,2
Результат испытаний (истинное значение)		43840 ± 940	68600 ± 2900	75300 ± 3900

Табл. 3. Результаты сравнительных испытаний на износостойкость по ГОСТ 2387-80 с периодическим окунанием в коррозионно активную среду (5% NaCl)

Показатель		Канат без смазки	Канат пропитан Nyrosten A19/200	Канат пропитан Росойл-К-110
Количество изгибов образца до полного разрушения каната	X_{max}	44 065	88 281	79 770
	X_{min}	36 318	53721	61 320
	\bar{X}	41 066	63 478	69 472
	X_{max}/X_{min}	1,213	1,55	1,3
	$\bar{X}/\bar{X}_{без\ смазки}$	1	1,64	1,69
Относительная погрешность результатов измерений, %		4,97	7,95	4,34
Результат испытаний (истинное значение)		41100 ± 2000	63500 ± 5100	69500 ± 3000

Табл. 4. Результаты сравнительных испытаний на износостойкость по ГОСТ 2387-80 в климатической камере при температуре минус (60±2) °С

Показатель		Канат без смазки	Канат пропитан Nyrosten A19/200	Канат пропитан Росойл-К-110
Количество изгибов образца до полного разрушения каната	X_{max}	159 851	245 119	230 807
	X_{min}	120 303	129 458	149 431
	\bar{X}	137 366	182 068	188 818
	X_{max}/X_{min}	1,329	1,893	1,545
	$\bar{X}/\bar{X}_{без\ смазки}$	1	1,32	1,37
Относительная погрешность результатов измерений, %		4,31	15,4	10,7
Результат испытаний (истинное значение)		137400 ± 2200	182100 ± 28000	188800 ± 20000

Заключение

Сравнительные испытания показали, что стальной канат пропитанный смазкой Росойл-К-110 обладает большей износостойкостью, чем канат, пропитанный канатной смазкой Nyrosten A 19/200.

Разработанная, как аналог канатной смазке Nyrosten A 19/200, канатная смазка Росойл-К-110 является универсальным смазочным материалом и может применяться для смазки стальных канатов, эксплуатирующихся в различных условиях эксплуатации.

[1] Velinsky S. A., Anderson G. L., Costello G. A. Wire rope with complex cross sections //Journal of Engineering Mechanics. – 1984. – Т. 110. – №. 3. – С. 380-391.

[2] Cardou, A., Jolicoeur, C. Mechanical models of helical strands. Appl. Mech. Rev. – 1997.

[3] Шолом В.Ю., Крамер О.Л., Головин В.П., Абрамов А.Н., Ваганов Р.Ф. Методы испытаний низкотемпературных свойств смазочных материалов для канатов. // Письма о материалах. – 2021. –Т. 11. – №. 2. – С. 187-191.

[4] Патент РФ №2640319 от 27.12.2017 Пат. 2463577 Российская Федерация, МКП:G01N19/02. Способ и устройство для испытания канатов на выносливость в жидких и агрессивных средах и при различных температурах / Шолом В.Ю., Никольская В.В., Абрамов К.А. и др.; заявитель и патентообладатель ООО ХТЦ УАИ - №2016122006; заявл. 02.06.2016; опубл. 27.12.2017. Бюл. № 20.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НАНОПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И ПОЛИВИЛИДЕНФТОРИДА

¹Горох Г.Г. *, ²Тураходжаев Н.Д., ¹Лозовенко А.А., ¹Федосенко В.С. ¹Иджи М.М.

*E-mail: gorokh@bsuir.by

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь;

²Ташкентский Государственный Технический Университет, Ташкент, Узбекистан.

Разработаны методики формирования пористых матриц анодного оксида алюминия при помощи анодирования Ta/Al биметаллических систем на алюминиевых пластинах. Исследованы различные техники заполнения нанопористых матриц функциональными полимерными материалами, такими как поливинилиденфторид (ПВДФ). В работе представлены исследования трибологических характеристик при помощи наноиндентирования и скретч-тестирования поверхностного слоя полученных материалов. Получены данные о коэффициенте пластичности, модулю Юнга, микротвердости нового композитного материала.

Ключевые слова: нанопористый оксид алюминия, полимерные композитные покрытия, поливинилиденфторида, коэффициент трения.

Введение

Одной из ведущих тенденций современной техники является использование материалов и изделий, структурированных на наномасштабном уровне. В научной литературе описаны закономерности изменения физико-механических характеристик нанопористых матриц после заполнения пор. В частности, экспериментально установлена возможность снижения коэффициента трения исследуемых пористых покрытий при использовании в качестве наполнителя антифрикционных полимеров [1,2,3]. Для получения наноструктурированных покрытий наиболее подходящими являются пористые матрицы анодного оксида алюминия АОА [4,5]. При этом следует учитывать, что увеличение степени заполнения (объемного содержания полимерной компоненты) может снизить эффективную прочность покрытия.

В работе описаны методы формирования пористых матриц из модифицированного АОА на алюминиевых пластинах, адаптированных к нанесению полимерных покрытий. Апробированы различные методы формирования функциональных

RESEARCH OF TRIBOLOGIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE COATINGS BASED ON NANOPOROUS ALUMINA AND POLYVILIDENE FLUORIDE

Gorokh G.G., Turakhodjaev N.D., Lozovenko A.A., Fedosenko V.S., Iji M.M.

Methods of nanoporous alumina formation by anodizing the Ta/Al system on aluminium plates were developed. Techniques of filling porous matrices with polyvidelene fluoride (PVDF) were studied. The paper presents the results of nanoindentation research and scratch tests, which provides data about coefficient of plasticity, Young's modulus, penetration depth of the nanoindenter and microhardness at a given indenter penetration depth of new composite material.

Keywords: nanoporous anodic alumina, polymer-containing composite, polyvinylidene fluoride, friction coefficient.

слоев из полимерных материалов на пористых матрицах и исследованы их трибологические характеристики. Проведены исследования важных для трибоматериаловедения микромеханических характеристик поверхностного слоя до и после трения, необходимых для прогнозирования износостойкости и выяснения механизма их износа, а именно: коэффициент пластичности, модуль Юнга, глубина проникновения наноиндентора и восстановления исследуемой поверхности при скретч-тестировании поверхностного слоя материала на заданной глубине и длине сканирования, а также микротвёрдость при заданной глубине проникновения индентора.

Материалы и методы

В качестве пористых матриц для нанесения функциональных покрытий использовали низкопрофильные матрицы АОА, сформированные в 0,4 М растворе винной кислоты, полученные анодированием тонкопленочной системы Ta/Al [6] толщиной 0,3/1,5 мкм на алюминиевой фольге толщиной 120 мкм. Электрохимическое анодирование образцов осуществляли в две стадии в гальваностатическом режиме при $j = 6 \text{ mA/cm}^2$.

Напряжения стационарного роста пор составляло 210 В. Электрические режимы анодирования задавали с помощью системного источника питания постоянного тока Keysight N5751A, регистрацию и мониторинг *in situ* параметров процесса электрохимического анодирования проводили с помощью цифрового мультиметра Keysight 34470A, соединенного посредством USB с персональным компьютером с установленным программным обеспечением Bench Vue [1].

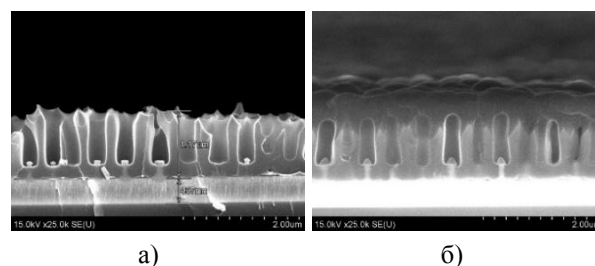
В качестве наполнителя использовали раствор поливинилденфторида (ПВДФ) марки Ф2МД в диметилформамиде. Состав ПВДФ представлял собой тягучую жидкость, которую предварительно растворяли в диметилформамиде в пропорции 1:3, тщательно размешивали, давали отстояться, чтобы вышли пузырьки и наносили на матрицу дозатором с объемом капли 0,1 мл от одной до пяти капель. После центрифугирования при $v \approx 3000$ об/мин в течение 20 с образцы подвергали многостадийной сушке и термообработке. Морфологию поверхности и поперечные сколы полученных структур изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) Hitachi S4-800 при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Трибологические и механические свойства полимерсодержащих анодных оксидных композитных пленок проводили с использованием Nano Scratch Tester (NST) и Ultra Nano Hardness Tester (UNHT) CSM Instruments. Скретч-тестером путем линейного царапания кантилевером ST-322 с алмазным наконечником радиусом 2 мкм,двигающимся вдоль поверхности структуры со скоростью 0,01 мм/с, при возрастающей нагрузке на конце кантилевера от 0,1 до 50 мН со скоростью 1 мН/с проводили измерения силы трения, коэффициента трения, устойчивости поверхности, глубины проникновения кантилевера относительно исходной толщины пленки от нагрузки.

Наноиндентирование осуществлялось с применением трехгранных алмазных инденторов Берковича. Опыты проводились при максимальных нагрузках P_{max} – 10, 30 и 50 мН. Процедура заключалась в нагружении индентора до P_{max} со скоростью 20 мН/мин и выдержке в течение 30 с и последующей разгрузке. Для каждого значения P_{max} для исследуемого образца выполнялось по 5 уколов для определения среднего значения микротвердости и модуля упругости. Анализ диаграмм наноиндентирования проводили по методике Оливера-Фарра [7].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ изображения сечения исходной матрицы АОА, а также исследуемых пленок с пленками ПВДФ. Толщина матрицы АОА составляла 1,2 мкм, под ней окисленный слой тантала толщиной 440 нм. После нанесения ПВДФ на поверхности АОА формируется тонкая пленка толщиной порядка 380–450 нм, заполняющая поры АОА. Поверхность пленки равномерная, полимер частично заполнил внутренний объем пор и остался на поверхности. Наблюдается вытягивание полимера в порах. Слой ПВДФ уплотняется над матрицей АОА, общая толщина составляет около 1,65 мкм, наблюдается возвышение полимера над порами.



а) б)
Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поверхности исходной матрицы АОА (а), а также матрицы АОА с нанесенным на нее слоем ПВДФ объемом 0,5 мл центрифугированием при $v \approx 3000$ об/мин в течение 20 с (б)

На рис. 2 представлены полученные в процессе испытаний графические интерпретации диаграммы увеличения нагрузки $F=f(h)$ и кинетические диаграммы, которые дают информацию о работе F_{pl} индентора на преодоление сопротивления материала и работе F_{el} материала на восстановление своих свойств. По этим данным определялась степень пластичности по формуле $\varepsilon_{pl} = (F_{pl} - F_{el})/F_{pl}$ и контактная жесткость S . Измерения проведены в десяти характерных участках поверхности исследуемого композита.

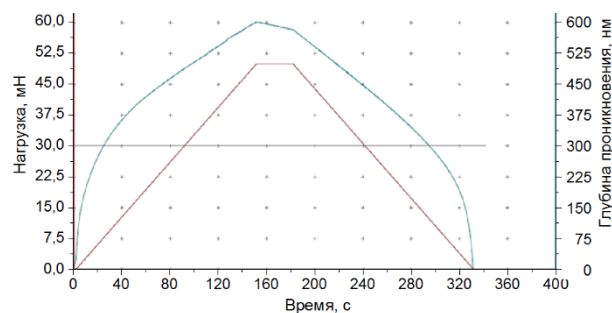


Рис. 2. Диаграмма изменения нагрузки F (1) и глубины проникновения индентора h (2) от времени воздействия анодированной системы Ta/Al на алюминии с ПВДФ

На рис. 3 представлено графическое изображение кинетической диаграммы при микровдавливании индентора в матрицу АОА с нанесенным на нее слоем ПВДФ, характеризующее процесс нагрузки (площадь под ветвью нагрузки) и разгрузки (площадь под ветвью разгрузки).

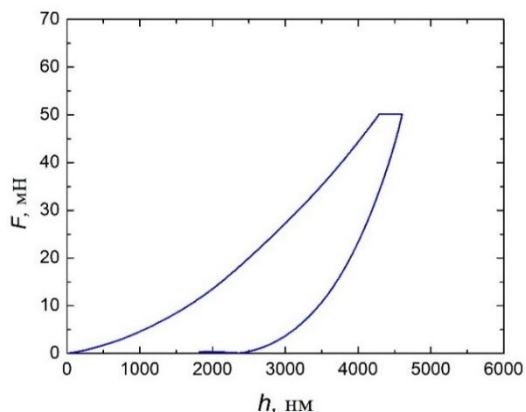


Рис. 3. Кинетическая диаграмма непрерывного микровдавливании индентора в зависимости от глубины indentирования анодированной системы Ta/Al на алюминии с ПВДФ

Диаграммы дают возможность определять микромеханические свойства поверхностного слоя материала при динамической индентации. В процессе скретч-тестирования при нагрузке на индентор 100 мН коэффициент трения для анодированной системы Ta/Al с нанесенным слоем ПВДФ изменяется от 0 до 1,28. Характер изменения глубины проникновения и восстановления индентора при скретч-тестировании при нагрузке на индентор 100 мН свидетельствует о высокой релаксационной способности композита после воздействия. Перемещение индентора Берковича выполнено в наиболее характерных местах материала. Анализ поверхности скретч-тестированных участков подтверждает механохимический механизм изнашивания нанопористых матриц АОА/Ta₂O₅ с внедренным ПВДФ. Длина сканирования L составляет 0,8 мм. Измерения проведены в семи характерных участках поверхности исследуемого композита после проведения трибологических испытаний. Установлено, что с увеличением нагрузки износ анодированной системы Ta/Al на алюминии с нанесенным ПВДФ растёт от 0,003 (при 10 МПа) до 0,042 г (при 40 МПа). Высокая износостойкость обусловлена хорошими релаксационными свойствами композита – 38,91 %. Представленные величины износа при различных нагрузках показывают, что в процессе трения матриц АОА с внедренным ПВДФ, имеет место нормальное механохимическое (окислительное) изнашивание ($0 < P \leq P_{кр}$), поскольку удельные нагрузки в

меньшей степени влияют на изменения скоростей процессов как окисления, так и восстановления [7].

В данном случае это влияние связано, в основном, с изменением величины и интенсивности пластической деформации поверхностного слоя матриц АОА заполненных ПВДФ.

Заключение

Высокая износостойкость полиамидных композитов указывает на целесообразность их использования для повышения ресурса широкой номенклатуры деталей машин и механизмов отраслевого машиностроения. Получены абсолютные значения важных для триболоматериаловедения микромеханических характеристик поверхностного слоя нанокompозита. Результаты исследований подтверждают высокие микромеханические свойства наноструктурированных композитов. Эти данные могут быть использованы для разработки инженерных методов прогнозирования их ресурса работы, расчета прочности, жесткости, износостойкости, напряженно-деформированного состояния, долговечности трибоматериалов деталей машин, работающих в условиях контактного взаимодействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф21УЗБГ-003).

- [1] Morris. D. G. Mechanical Behaviour of Nanostructured Materials // Materials science foundations. – 1998. – № 2. – С. 26-84.
- [2] Горох Г.Г., Шилько С.В., Лозовенко А.А., Иджи М.М., Рябенко Т.В., Захлебаева А.И. Полимерсодержащие нанокompозитные покрытия для изделий машиностроения // Труды международной научно-технической конференции “Машиностроение и техносфера XXI века”. – 2020. – Р. 45-49.
- [3] Lei Y., Cai W., Wilde. G. Highly ordered nanostructures with tunable size, shape and properties: A new way to surface nanopatterning using ultra-thin alumina masks // Prog. Mater. Sci. – 2007. – V. 52. – №. 4. – P. 465-698.
- [4] Юров В.М. и др. Некоторые вопросы механических свойств наночастиц и наноматериалов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12-2. – С. 349-353.
- [5] Gorokh G.G., Pashechko M.I., Borc J.T., Lozovenko A.A., Kashko I.A., Latos A.I. Matrix coatings based on anodic alumina with carbon nanostructures in the pores / Applied surface science. – 2018. – V. 43. – P. 829-835
- [6] Плескачевский Ю.М., Горох Г.Г., Казаченко В.П., Плиговка А.Н., Шилько С.В., Таратын И.А., Хатько В.В. Исполнительные элементы МЭМС на основе композиционных интеллектуальных материалов с матрицами из пористых и вертикальных наноструктур / Приборостроение–2016: материалы 9-ой Международной конференции. – 2016. – С. 360-362.
- [7] Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of materials research – 1992. – № 6. – P. 1564-1583.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТРЕНИЯ МЯГКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Горячева И.Г. *, Маховская Ю.Ю.

*E-mail: goryache@ipmnet.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

Предложена модель для оценки толщины смазочной пленки, образующейся на поверхности композиционного материала в условиях его фрикционного взаимодействия с жестким не изнашиваемым контртелом. На основе построенной модели проведен анализ влияния структуры композита, а также свойств матрицы и мягких структурных составляющих, на количество выделяемой в зону трения мягкой фазы, обеспечивающей эффект самосмазывания.

Ключевые слова: композиционный материал, мягкая структурная составляющая, фрикционное взаимодействие, самосмазывание.

Введение

Композиционные материалы, способные образовывать в процессе фрикционного взаимодействия промежуточный слой между контактирующими поверхностями, обладающий смазывающим действием и снижающий таким образом эксплуатационный коэффициент трения, являются востребованными в трибосопряжениях, в которых затруднительно применение традиционных смазочных материалов (например, в условиях космического пространства). Такие материалы используются также в качестве покрытий в подшипниках скольжения. В критических условиях трения, когда контактные давления и температуры велики, а количества жидкой смазки недостаточно для обеспечения работы в гидродинамическом режиме, образование третьего тела в виде пленки, состоящей из мягких структурных составляющих антифрикционного сплава, предотвращает возникновение задиров и схватывания контактирующих поверхностей. К таким материалам относятся, в частности, алюминиевые сплавы [1,2]. В [3] экспериментально подтверждено возникновение смазывающей пленки на контактирующей поверхности алюминиевого сплава и ее перенос на поверхность контртела в условиях фрикционного взаимодействия.

В данной работе построена общая модель выделения мягких структурных составляющих в

MODELING OF THE EXUDATION OF THE SOFT COMPONENT OF A COMPOSITE MATERIAL ONTO THE FRICTION SURFACE

Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu.

A model is proposed for estimating the thickness of a lubricating film formed on the surface of a composite material under conditions of its frictional interaction with a rigid non-wearable counterbody. Based on the constructed model, the analysis of the influence of the composite structure, as well as the properties of the matrix and soft structural components, on the amount of the soft phase supplied into the friction zone, providing the effect of self-lubrication, is carried out.

Keywords: composite material, soft structural component, friction interaction, self-lubrication.

зону фрикционного взаимодействия композиционного материала, состоящего из деформируемых матрицы и включений и обладающего разными значениями модулей Юнга, коэффициентов Пуассона, пределов текучести и коэффициентов теплового расширения его структурных элементов.

Постановка задачи

Рассматривается задача в плоской постановке о скольжении жесткого шероховатого индентора по поверхности композита (рис. 1), состоящего из матрицы и включений мягкой фазы, различающихся своей концентрацией в композите, а также механическими и теплофизическими свойствами.

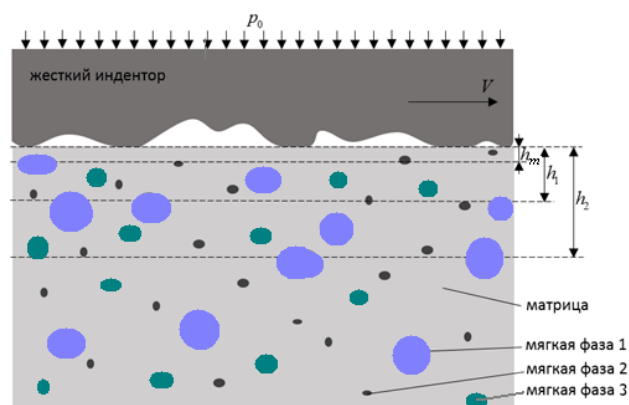


Рис. 1. Схема контактной задачи

В качестве входных параметров модели используются следующие характеристики материалов матрицы (индекс m) и включений (индекс i , $i=1..n$): модули Юнга E_m, E_i ; коэффициенты Пуассона ν_m, ν_i ; температурные коэффициенты линейного расширения α_m, α_i ; пределы текучести σ_m^y, σ_i^y ; коэффициенты теплопроводности λ_m, λ_i и температуры плавления $T_i^{пл}$ структурных составляющих; начальные объемные концентрации включений n_i , среднее расстояние между включениями d .

На поверхности трения считаются заданными среднее расстояние между поверхностными неровностями индентора l и средний радиус неровности R_0 ; номинальное давление p_0 и температура на контактной поверхности T_0 ; скорость относительного скольжения поверхностей V ; коэффициент трения поверхностей μ ; коэффициент разделения тепловых потоков на поверхности трения k , определяющий мощность потока, идущего в композит.

Предполагается, что мягкая фаза выделяется на поверхность трения вследствие ее пластического течения по границам зерен матрицы при деформировании композита. Выдавливание мягкой фазы происходит как при упругом, так и при пластическом деформировании матрицы. При этом в областях упругого деформирования матрицы количество выходящей на поверхность мягкой структурной составляющей определяется деформированием матрицы. Кроме того, образование поверхностной смазывающей пленки происходит также за счет плавления легкоплавких структурных составляющих композита вследствие повышения температуры на пятнах контакта. Поэтому для оценки толщины смазочной пленки требуется провести расчет распределения температур и напряжений в исследуемом композите с учетом его структуры и параметров контактного взаимодействия.

Расчет полей напряжений и температур в композите.

При трении по шероховатому контртелу напряжения и температуры в каждой точке сплава изменяются циклически. Однако, с точки зрения выделения мягкой фазы на поверхность трения главную роль играют максимальные по амплитуде значения температур $T(z)$, максимальных касательных $\tau_{max}(z)$ и гидростатических напряжений $p(z)$ в каждой точке сплава при прохождении над ней поверхностного выступа контртела. Соответственно, области, в которых происходит пластическое деформирование матрицы и мягких

компонент сплава, считаются имеющими форму приповерхностных слоев постоянной толщины: h_m – слой, в котором происходит пластическое течение матрицы, а h_i – слои, в которых происходит пластическое течение мягких компонент сплава ($i = 1, \dots, n$).

Оценка распределения по глубине напряжений и температуры в композите в условиях фрикционного взаимодействия с поверхностью жесткого шероховатого контртела проводится с использованием его эффективных (осредненных) упругих характеристик и коэффициента теплопроводности, которые рассчитываются по известным механическим характеристикам его структурных составляющих, используя подходы, разработанные в [4,5], или определяются экспериментально.

Наличие поверхностной шероховатости приводит к дискретному характеру контакта между рассматриваемым сплавом и контртелом. Это, в свою очередь, ведет к неоднородности полей температуры и напряжений в приповерхностном слое, поскольку внешняя нагрузка и фрикционный тепловой поток имеют место лишь на пятнах фактического контакта. Принимая во внимание оценку, сделанную в [6], в расчетах предполагается, что напряжения, вызванные неоднородностью теплового потока через границу покрытия, малы по сравнению с напряжениями, вызванными нагрузкой на пятнах контакта, что позволяет использовать решение задачи Герца для расчета внутренних напряжений.

Локальное приращение температуры на пятне контакта над средней температурой T_0 поверхности трения можно оценить из соотношения [7]:

$$T = T_0 + \frac{8}{3\pi} \frac{k\mu p_m V a}{\lambda}$$

В качестве среднего давления на единичном пятне контакта p_m необходимо взять среднее давление $p_m = 2p_{max}/3$ в случае, когда матрица находится в упругом состоянии и $p_m = 3\sigma_m^y$, когда матрица на поверхности находится в пластическом состоянии.

Расчет количества выделившейся на поверхность трения мягкой структурной составляющей.

Согласно сделанным предположениям, в слое, где имеет место пластическая деформация матрицы, т.е., при $z \leq \square_m$, все включения полностью выдавливаются на поверхность. При этом концентрация всех видов мягких фаз, остающихся в слое, становится равной нулю.

В областях, в которых матрица деформируется упруго, а включения находятся в состоянии пластического течения, т.е. при $h_m < z \leq h_i$, $i = 1..n$, объем выдавленной на поверхность мягкой фазы определяется деформацией включений каждого вида. Для оценки величины деформации включений в [8] предложено заменить реальную структуру композита периодической структурой, при этом шаг решетки определяется средним размером зерна матрицы d , а радиус i -го структурного элемента – его концентрацией в сплаве. Деформация включений определяется из решения задачи Ламе в предположении, что во включении максимальные касательные напряжения достигли предела текучести материала i -го структурного элемента.

В результате оценивается концентрация каждой из компонент мягкой фазовой составляющей $n_i^{ocm}(z)$ ($i = 1, \dots, n$), которая остается в сплаве после выдавливания части этой составляющей на поверхность:

$$n_i^{ocm}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq h_m \\ \left(\frac{R_i - \Delta R_i(z)}{R}\right)^3 & h_m < z \leq h_i \\ n_i & z > h_i \end{cases}$$

и объем мягкой фазы каждого вида, выделившийся на поверхность композитного слоя:

$$V_i = S \int_0^{h_i} [n_i - n_i^{ocm}(z)] dz$$

где S – площадь поверхности, $\Delta R_i(z)$ – изменение радиуса структурного элемента при его деформировании. Суммарный объем выделившейся на поверхность мягкой структурной составляющей определяется как $V = \sum_i V_i$.

С учетом объема $S n_i R_i$ мягких структурных составляющих композита, которые выходят на поверхность и могут выделиться в зону контактного взаимодействия в процессе трения, для расчета средней толщины смазочной пленки, возникающей на поверхности композита, получено следующее выражение [8]:

$$\delta = \sum_{i=1}^n n_i \left[h_i - R_i - \int_{\max(R_i, h_m)}^{h_i} \left(1 - \frac{\Delta R_i(z)}{R_i}\right)^3 dz \right]$$

Выводы

Для композиционного материала, характеризующегося разными значениями упругих модулей и пределов текучести его структурных составляющих, построена модель образования смазочного слоя (третьего тела) в условиях его

фрикционного взаимодействия с жестким шероховатым контртелом. При моделировании приняты во внимание параметры шероховатости контртела, фрикционный разогрев поверхностных слоев композита, а также концентрация структурных составляющих в композите. Разработанная модель может быть использована для анализа влияния свойств матрицы и структурных составляющих композиционных материалов, в том числе сплавов, на количество выделяемых в зону трения мягких составляющих композита, обеспечивающих эффект самосмазывания в различных режимах трения. Апробирование разработанной модели для анализа толщины пленки смазки, формирующейся в условиях фрикционного взаимодействия трехкомпонентного алюминиевого сплава, показало, что расчетная толщина пленки коррелирует с измеренным в эксперименте коэффициентом трения, что позволяет управлять компонентным составом сплава с целью снижения коэффициента трения при заданных условиях взаимодействия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-49-02010.

- [1] Подшипники из алюминиевых сплавов / Н.А. Буше – М.: Транспорт, 1974. – 225 с.
- [2] Курбаткин И.И. и др. Трибологические и структурные исследования новых антифрикционных материалов на основе алюминия. // Трение и износ. – 2014. – Т.35. – №2. – С.52-57.
- [3] Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения. / Н.А. Белов, Е.И. Гершман, И.С. Гершман и др. – М.: МИСиС, 2016. – 222 с.
- [4] Dai L. H., Huang Z. P., Wang R., Explicit expressions for bounds for the effective moduli of multi-phased composites by the generalized self-consistent method // Comp. Sci. Technol. – 1999. – V.59. – P. 1691-1699.
- [5] Теплопроводность смесей и композиционных материалов. / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. - Л.: Энергия, 1974. – 261 с.
- [6] Буше Н.А., Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю. Влияние фазового состава антифрикционных алюминиевых сплавов на их самосмазывание при трении // Трение и износ. – 2002. – № 4. – С. 286-295.
- [7] Теплопроводность твердых тел. / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
- [8] Маховская Ю.Ю., Горячева И.Г. Моделирование выделения мягкой фазы на поверхность многокомпонентного алюминиевого сплава при трении // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 15-23.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С КОМПОЗИЦИОННЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш. *, Гусев А.С.

*E-mail: Migmars@mail.ru

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.

Представлены результаты экспериментальных исследований износостойкостных показателей концевых фрез с многослойными композиционными покрытиями при лезвийной обработке резанием титановых сплавов, которые широко применяются в ответственных, тяжело нагруженных и высокотемпературных трибосопряжениях авиакосмической техники. Исследованы перспективные и инновационные износостойкие покрытия, полученные на различных установках и по разным технологиям.

Ключевые слова: концевые фрезы, многослойные композиционные покрытия, титановые сплавы, тяжело нагруженные трибосопряжения, высокотемпературные трибосопряжения.

Введение

В условиях современного машиностроительного производства все большее применение находят титановые сплавы ввиду уникальности их свойств: обеспечение легкости конструкции в сочетании с необходимой прочностью; безотказная работоспособность в узлах высокотемпературных и тяжело нагруженных трибосопряжений; высокая стойкость к воздействию различных агрессивных сред и т.д. Привлекательность титанового сплава для изготовления ответственных деталей авиакосмической техники заставляет исследователей уже несколько десятилетий проводить работы по повышению эффективности лезвийной обработки резанием. И это связано с несколькими факторами: сложность конструктивных исполнений деталей (сложнопрофильные с различным сечением срезаемого слоя; тонкостенные и длинномерные); внедрение в производство современных высокоскоростных обрабатывающих центров, где режимы резания выросли на порядок (что привело к существенному изменению температурно-силовых условий в контактной зоне «деталь - третье тело (покрытие) – режущий инструмент») и ужесточились показатели качества обработанной поверхности; низкая температуропроводность титановых сплавов и локализация высоких

STUDY OF TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF CUTTING TOOLS WITH COMPOSITE MULTILAYER COATINGS

Grigoriev S.N., Volosova M.A., Migranov M.Sh., Gusev A.S.

The paper presents the results of experimental studies of wear resistance of end mills with multilayer composite coatings for blade cutting of titanium alloys, which are widely used in critical, heavy-duty and high temperature tribocontainments of aerospace equipment. Promising and innovative wear-resistant coatings obtained on different installations and by different technologies are investigated.

Keywords: end mills, multilayer composite coatings, titanium alloys, heavy-duty tribocouplings, high-temperature tribocouplings.

температур на маленькой площади контакта режущего клина приводит интенсивному изнашиванию обрабатываемого инструмента; мало изученность и необходимость учета особенностей многолезвийной обработки (фрезерование, сверление, протягивание и т.д.); не менее важно и необходимо отметить, что высокопроизводительные инструменты относятся к объектам двойного назначения и зависимость отечественного производства от зарубежных поставок несет определенные риски, которые нежелательны и др. [1-8].

Целью работы является исследование триботехнических характеристик многофункциональных износостойких покрытий для улучшения эксплуатационных свойств режущего инструмента на основе совершенствования технологии нанесения и рецептуры физико-химического состава.

Теоретико-экспериментальные предпосылки

Согласно исследованиям [7-18], процесс лезвийной обработки резания титановых сплавов характеризуется высокой температурой в зоне резания (снимаемой стружки и материала зуба фрезы) и значительным давлением (500 кгс/мм²). При этом известно, что титановые сплавы при высоких температурах склонны к самоупрочнению и это способствует формированию тонкой сливной стружки при обработке на высоких скоростях

резания. Как следствие имеет место существенного изменения контактных процессов, в том числе и при использовании твердосплавного инструмента, в частности: к уменьшению площади зоны соприкосновения стружки с поверхностью режущего клина, что приводит к значительному увеличению удельных нагрузок на кромки, даже когда его обрабатывают твердосплавными фрезами. Трение стружки о переднюю поверхность режущего инструмента и пластическая деформация стружки и обработанной поверхности детали способствуют значительному изменению градиента температуры в локализованной части фрезы. При этом образовавшееся тепло, вследствие особенностей физико-механических свойств большинства титановых сплавов, из-за их плохой проводимости практически не рассеивается в окружающую среду и локализуется в контактной зоне режущего клина режущего инструмента и обработанной поверхности заготовки, повышая в целом термонагруженность кромок фрезы. Такое сочетание удельных нагрузок и высокой термонагруженности контактной зоны в предельной близости от режущего клина способствует быстрому разрушению режущего инструмента. Решение вопроса повышения износостойкости концевых фрез путем применения инновационных композиционных покрытий тоже имеет свои недостатки, и они связаны с тем, что титановые сплавы химически активны и имеют сильную тенденцию химического сродства с элементами покрытия и твердосплавного инструмента, а также способности приварки стружки к режущим кромкам фрезы. Во-вторых, нагрузка на зуб от титановой стружки, как правило, распределяется неравномерно. Она выше в точке, где режущая кромка твердосплавной фрезы врезалась дальше всего в титановую заготовку, и ниже в других областях резания. Надо отметить, что одним из наиболее отрицательных эффектов при резании титановых сплавов являются явление химического сродства с используемым покрытием и адгезии [6, 12-18]. Наконец, когда фреза для ЧПУ заполняет большую часть ширины паза, остаётся мало места для удаления стружки, так что вероятность повторного фрезерования титановой стружки очень высока.

Оборудование и методика экспериментальных исследований

Для решения вышеизложенных проблем были проведены серии экспериментальных исследований по разработке и нанесению многослойных композиционных покрытий, как на отечественных установках для физического осаждения покрытий

ННВ 6.6 - И1 с различными дополнительными устройствами, так и зарубежных аппаратах «Platit π311» и «Platit π411». На предварительной стадии для уменьшения времени на определении эффективного состава покрытий и режимов их нанесения, а также затрат как инструментального, так и катодного материала были проведены адгезионные испытания. Для оценки триботехнических параметров (τ_{nn} , p_{rn} , τ_{nn}/p_{rn}) использовали экспериментальный метод [6]. В основе этого метода принята физическая модель (рис. 1), которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте. Согласно этой модели, сферический индентор 2 из инструментального материала с различными покрытиями (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твёрдых тел), сдавленный двумя плоскопараллельными образцами 1 из обрабатываемого материала (с высокой точностью и чистотой контактирующих поверхностей) вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила F , расходуемая на вращение индентора и приложенная к тросику 3, уложенному в паз диска 4, связаны главным образом со сдвиговой прочностью τ_{nn} адгезионных связей [6].

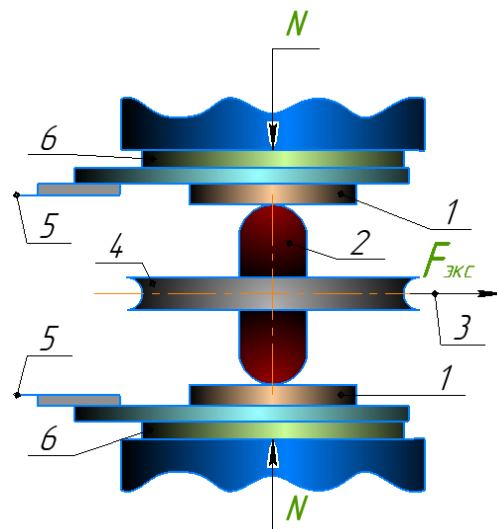


Рис. 1. Модель фрикционного контакта

Прочность τ_n адгезионных связей на срез определяется из соотношения:

$$\tau_n = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{экс}}{\pi} \cdot \frac{R_{экс}}{r_{отн}^3}, \quad (1)$$

где $F_{экс}$ – окружная сила на диске, вращающая индентор; $R_{экс}$ – радиус диска, в котором закрепляется индентор; $r_{отн}$ – радиус отпечатка (лунки) на образцах.

Из-за малых размеров отпечатка предполагается, что нормальные напряжения, действующие на

поверхность сферы, постоянны и равны в области всего отпечатка. Они рассчитываются как

$$p_r = \frac{N}{n \cdot r_{омн}^2} \quad (2)$$

Адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения равна:

$$f_M = \frac{\tau_n}{p_r} = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_{экс}}{N} \cdot \frac{R_{экс}}{r_{омн}} \quad (3)$$

Натурные экспериментальные исследования при фрезеровании проводились на аттестованном оборудовании для обеспечения достоверности полученных результатов испытаний. Испытания проводились на вертикально-фрезерных станках «Knuth WF 4.1» и «BM 127M». Для исследования закономерностей износа режущих инструментов при торцевом встречном фрезеровании твердосплавными концевыми фрезами (диаметр 12 мм; $z = 4$) марки Н10F (аналог ВК10 ОМ) с различными покрытиями был выбран титановый сплав ВТ3-1. Для проведения износостойкостных испытаний были выбраны твердосплавные концевые фрезы из мелкозернистого твердого сплава Н10F (ВК10 ОМ) с четырьмя зубьями с цилиндрическим хвостовиком для обработки плоских поверхностей; обработки внутренних и наружных радиусов и для снятия фасок с углом. Исследование обрабатываемости материала при натурных испытаниях осуществлялось, согласно рекомендациям и режимам используемые на предприятии при $n = 2000$ об/мин; $S = 200$ мм/мин; $a_e = 5$ мм; $a_p = 1,5$ мм.

Ширину h_3 фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР-2М с насадкой МОВ-15 точностью отсчета до 0,002 мм на рабочем месте и по достижении $h_3 = 0,35-0,4$ мм для дополнительного

контроля и фотофиксации картины износа использовался универсальный моторизированный стереомикроскоп с возможностью телекоммуникации «Carl Zeiss Stereo Discovery V12» с системой визуализации на базе видеокамеры «Zeiss AxioCam 503 Color» 3 мп.

Износостойкость режущего инструмента характеризуется периодом его стойкостью T и определяется

$$T = \frac{l}{v} \quad (4)$$

при соответствующем критерии затупления $h_3^{кр}$ и относительных линейном $h_{ОЛ}$ и поверхностным относительным износом $h_{ОЛ}$:

$$h_{ОЛ} = \frac{h_{3,к} - h_{3,н}}{l_K - l_H} \quad (5)$$

или

$$h_{ОЛ} = \frac{(h_{3,к} - h_{3,н}) * 100}{(l_K - l_H) * S}$$

Результаты и обсуждение

Были проведены серии экспериментальных натурных испытаний покрытий последнего поколения для режущего инструмента на основе многослойно-композиционной архитектуры таких как: из нитридов и карбидов титана, алюминия, хрома и кремния с дополнительным алмазоподобным слоем (DLC – diamond laser coating) - AlTiN, TiN, TiCN, TiAlN, TiAlCrN, AlTiCrN, AlCrTiN, TiAlSiN, CrAlSiN, CrAlSiN+DLC и наиболее современные разработки: $n\text{AlCo}^3$, $n\text{AlCrO}^4$ – нанокompозитные покрытия соответственно на основе TiAl и CrAl, состоящие из наночастиц, пребывающих в связующей аморфной матрице.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 2 и 3.

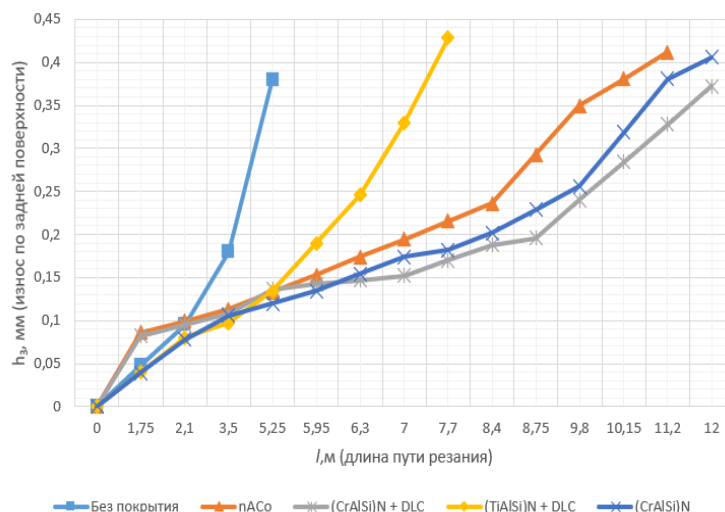


Рис. 2. Влияние длины пути резания на износ по задней поверхности при фрезеровании титанового сплава ВТ3-1 твердосплавными фрезами марки Н10F (ВК10 ОМ) различными покрытиями при $n = 2000$ об/мин, $S_{мин} = 200$ мм/мин, $a_e = 5$ мм, $a_p = 1,5$ мм.

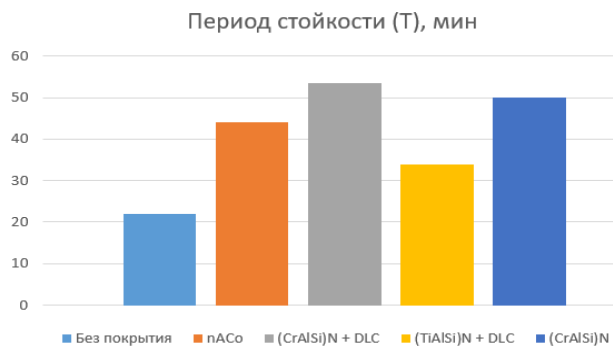


Рис. 3. Зависимость периода стойкости (Т) от применяемого покрытия при фрезеровании титанового сплава BT3-1 твердосплавными фрезами марки H10F (BK10 OM) при $h_c = 0,35$ мм; $n = 2000$ об/мин, $S_{мин} = 200$ мм/мин, $a_c = 5$ мм, $a_p = 1,5$ мм

По результатам экспериментальных исследований установлено, что:

- по адгезионным испытаниям, по величине коэффициента трения наиболее предпочтительным являются многослойные композиционные покрытия: CrAlSiN+DLC (с дополнительным алмазоподобным покрытием) и CrAlSiN;
- по износостойкостным испытаниям, наибольшая длина пути резания и период стойкости инструмента обеспечивается при многослойных композиционных покрытиях: CrAlSiN+DLC (с дополнительным алмазоподобным покрытием) и CrAlSiN.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках задания в сфере научной деятельности (проект № FSES-2021-0003).

- [1] Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.: Высшая школа, 2009. – 336 с.
- [2] Табаков В.П., Сагитов Д.И. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания. – Ульяновск: УлГТУ, 2015 – 179 с.
- [3] Верещака А.А., Григорьев С.Н. Теоретическое обоснование выбора рациональной архитектуры и элементов состава многослойно-композиционных износостойких покрытий. М.: МГТУ «СТАНКИН», 2020. – 141с.
- [4] Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р. Наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия. – М.: «Издательство «Инновационное машиностроение», 2017. – 367 с.
- [5] Григорьев С.Н., Верещака А.А., Волосова М.А. Современные многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия для твердосплавного и керамического режущего инструмента. МГТУ «СТАНКИН», 2020. – 164 с.

- [6] Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Издательство «Гилем». Уфа. 1999. – 198 с.
- [7] Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F., Sitnikov N., Migranov M., Andreev N., Bublikov Yu., Sotova C. Investigation of tribological and functional properties of Cr, Mo- (Cr, Mo) N- (Cr, Mo, Al) N multilayer composite coating //Tribology International. 2021. V. 155. P. 106804.
- [8] Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool //Journal of Friction and Wear. 2018. V. 39. №. 3. P. 245–250.
- [9] Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Гусев А.С., Садыков А.Ф. Изнашивание режущего инструмента с многослойными композиционными покрытиями. //Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 2 (6). 2020. С. 36-41.
- [10] Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Температура резания при применении инструмента с многослойным покрытием. //Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». № 3 (11). 2021. С. 34-43.
- [11] Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6 (66). С. 37-42
- [12] Метель А.С., Болбуков В.П., Волосова М.А., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А. Устройство для осаждения тонких металлических пленок с бомбардировкой быстрыми атомами аргона. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 3. С. 114.
- [13] Vereschaka A.A., Volosova M.A., Grigoriev S.N., Vereschaka A.S. Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition // Procedia CIRP. Sep. "2nd CIRP Global Web Conference - Beyond Modern Manufacturing: Technology for the Factories of the Future, CIRPe 2013" 2013. С. 8-12.
- [14] Григорьев С.Н., Волосова М.А. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики // Вестник машиностроения. 2005. № 9. С. 32-36.
- [15] Кузин В.В., Григорьев С.Н., Волосова М.А. Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости. // Новые огнеупоры. 2013. № 9. С. 52-57.
- [16] Григорьев С.Н., Соболев О.В., Береснев В.М., Сердюк И.В., Погребняк А.Д., Колесников Д.А., Немченко У.С. Триботехнические характеристики (TiZrHfVNBa)N покрытий, полученных методом вакуумно-дугового осаждения // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 5. С. 539-545.
- [17] Соболев О.В., Андреев А.А., Григорьев С.Н., Горбань В.Ф., Волосова М.А., Алешин С.В., Столбовой В.А. О влиянии высоковольтных импульсов на структуру и свойства вакуумно-дуговых покрытий нитрида титана // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 4 (682). С. 43-51
- [18] Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Sitnikov N.N., Batako A.D. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coatings and their influence on cutting tool life. //Wear. 2017. Т. 390-391. С. 209-219.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВВЕДЕНИЯ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРИСАДОК К БИОДЕГРАДИРУЕМЫМ ПЛАСТИЧНЫМ СМАЗКАМ

¹Григорьев Ф.А. *, ¹Ковалева И.Н. **, ²Марченко Л.Н., ¹Подгорная В.В.

*E-mail: grigoriev.feodor@gmail.com, **E-mail: innakov@tut.by

¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого», Гомель, Беларусь;

²Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь.

Исследован пластичный смазочный материал на основе рапсового масла с антиокислительной присадкой дифениламин (ДФА). Показано, что температура введения присадки влияет на окислительную стабильность конечного продукта и оптимальным является диапазон температур 85-95 °С. Предложена комплексная методика определения оптимальной температуры технологического процесса на основе интегрального показателя, учитывающего критерии отбора по эталонным значениям. Согласно методике, сделан вывод о рекомендуемой температуре изготовления представленного смазочного материала.

Ключевые слова: пластичный смазочный материал, кальциевый загуститель, рапсовое масло, трибология, износ, интегральный показатель.

Введение

Высокие температурные воздействия в ходе технологического процесса изготовления пластичных смазочных материалов с дисперсионной средой из растительного сырья оказывают негативное действие на их окислительную стабильность. Такое воздействие приводит к существенному ухудшению предела прочности смазок на сдвиг, коллоидной стабильности и комплекса триботехнических характеристик. Кислая первичная среда интенсифицирует процессы окисления, продолжая негативно влиять на функциональные показатели смазочных материалов.

Одним из путей решения данной проблемы является введение в смазочную композицию антиокислительных присадок [1]. На первом этапе исследования [2], дисперсионная среда рапсового масла подвергалась модифицированию до технологического процесса изготовления пластичной смазочной композиции, что снижало ее свойства из-за воздействия высокой температуры обработки.

OPTIMIZATION OF THE TEMPERATURE OF INTRODUCTION OF ANTIOXIDANT ADDITIVES TO BIODEGRADABLE GREASES Grigoriev F.A., Kavaliova I.N., Marchenko L.N., Podgornaya V.V.

A grease on the basis of rapeseed oil with the antioxidant additive diphenylamine (DPA) has been investigated. It is shown that the temperature of additive introduction influences the oxidative stability of the final product and the optimal range is 85-95 °C. A comprehensive methodology for determining the optimum process temperature on the basis of an integral index that takes into account the selection criteria by reference values has been proposed. According to the methodology, a conclusion about the recommended manufacturing temperature of the presented lubricant has been made.

Keywords: grease, calcium soap, rapeseed oil, tribology, wear, integral index.

Целью работы являлось определение оптимальной (минимально возможной) температуры введения антиокислительных присадок в процессе изготовления смазочного материала.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований был выбран пластичный смазочный материал на основе кальциевого загустителя, с рапсовым нерафинированным техническим маслом в виде дисперсионной среды. В качестве антиокислительной присадки использован дифениламин (ДФА). Содержание свободных кислот в полученных пластичных смазках определяли методом титрования по ГОСТ 6707-76, предел прочности на сдвиг определяли с использованием прибора ЛИНТЕЛ СК-20 по ГОСТ 7143-73. Коллоидная стабильность оценивалась с использованием ЛИНТЕЛ АКС-20 по ГОСТ 7142-74. Триботехнические характеристики определяли на четырехшариковой машине трения ЧШМ-К1 по ГОСТ 9490-75.

Результаты и их обсуждение

Из данных, представленных в табл. 1 следует, что оптимальным для введения ДФА является температура 85-95 °С. При этой температуре концентрация свободных кислот остается на стабильном уровне, практически не меняясь со временем.

Табл. 1. Химические, физико-механические и триботехнические свойства смазочных материалов с различной температурой введения антиокислительной присадки

Смазочный материал	Содержание свободных кислот, мгКОН/г		Коллоидная стабильность, %	Предел прочности на сдвиг, Па	Температура каплепадения, °С	Показатель износа, мм
	0 дней	10 дней				
К15Р.т.-У	2,968	4,549	10,55	114	237	0,89
К15Р.т.-У1ДФА (0)*	0,730	0,990	20,08	88	208	0,88
К15Р.т.-У1ДФА (75)	0,560	0,094	16,79	52	185	1,14
К15Р.т.-У1ДФА (85)	0,208	0,221	7,44	175	246	0,96
К15Р.т.-У1ДФА (95)	0,164	0,263	25,6	52	180	1,11
К15Р.т.-У1ДФА (105)	0,282	0,442	18,99	130	243	0,94

*— антиокислительная присадка введена на начальном этапе технологического процесса

Влияние температуры на комплекс функциональных характеристик не столь очевидно, и требует многокритериального анализа данных с учетом значимости и оптимальных значений анализируемой совокупности параметров. С этой целью была разработана методика определения оптимальной температуры введения антиокислительной присадки, соответствующей минимуму суммы отклонений значений результирующих функциональных параметров от оптимальных [3]. В качестве критериев использовали следующие параметры:

- Y1 – содержание свободных кислот, мгКОН/г;
- Y2 – коллоидная стабильность, %;
- Y3 – предел прочности на сдвиг, Па;
- Y4 – температура каплепадения, °С;
- Y5 – показатель износа, мм.

Данные критерии должны удовлетворять условиям, представленными в табл. 2, являющимися экспертными оценками. Для унификации экспериментальных данных были заданы эталонные

значения критериев, представляющие собой наилучшие показатели анализируемых свойств.

Табл. 2. Границы и эталонные значения критериев

Критерий	Границы	Эталонное значение
Y1 – содержание свободных кислот, мгКОН/г	[0; 1]	0,2
Y2 – коллоидная стабильность, %;	[10; 20]	20
Y3 – предел прочности на сдвиг, Па	[100; 200]	200
Y4 – температура каплепадения, °С	-	max
Y5 – показатель износа, мм	[0,7; 1,5]	0,7

Реализация метода включала следующие этапы:

- формирование матрицы унифицированных показателей;
- оценка интегрального показателя эффективности смазочного материала путем перекрестной сверки критериев;
- ранжирование температурных режимов согласно значениям, интегрального показателя.

Приведение показателей Y1, Y2, Y3, Y4, Y5 к унифицированным значениям X1, X2, X3, X4, X5 осуществлялось следующим формулам:

1 – если большее значение показателя означает лучшее качество, то

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - y_{j \min}}{y_{j \max} - y_{j \min}},$$

2 – если большее значение показателя означает худшее качество, то

$$x_{ij} = \frac{y_{j \max} - y_{ij}}{y_{j \max} - y_{j \min}},$$

3 – если используется эталонное значение $x_{j \text{opt}}$, то

$$x_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - y_{j \text{opt}}|}{\max\{y_{j \text{opt}} - y_{j \min}; y_{j \max} - y_{j \text{opt}}\}}.$$

Здесь x_{ij} – унифицированное значение j -го критерия при i -ой температуре, $i \in \{0, 75, 85, 95, 105\}$, $j = 1, \dots, 5$.

Табл. 3. Унифицированные значения показателей

°С	X1	X2	X3	X4	X5
0*	0,00	0,99	0,24	0,58	0,59
75	0,32	0,74	0,00	-0,02	0,61
85	0,98	0,00	0,83	-1,00	0,77
95	0,93	0,55	0,00	-0,73	0,64
105	0,85	0,92	0,53	-0,99	0,79

Полученные унифицированные значения, (табл. 3.) использовались для расчета интегрального показателя эффективности, который характеризует суммарное отклонение выбранных критериев от эталонных значений для каждой температуры:

$$R_i = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (1 - x_{ij})^2}.$$

Согласно выбранной метрики наибольшее значение R_i соответствует температуре введения модификатора, обеспечивающей наилучшие рассматриваемые функциональные параметры смазочного материала.

Табл. 4. Интегральный показатель и соответствующие ранги значений температуры

°С	R_i	Ранг
0	1,39	5
75	1,65	4
85	2,25	1
95	2,08	2
105	2,06	3

В табл. 4 приведены значения интегрального показателя и соответствующие ранги значений температуры с оптимальными характеристиками относительно эталонных значений. Так, наибольшее значение интегрального показателя соответствует температуре, для которой значения критериев наиболее близки к эталонным. Ранг «1» говорит о наилучшем значении температуры. Анализ данных таблицы свидетельствует, что для выбранных эталонных значений, наилучшие характеристики смазочных материалов достигаются при введении антиокислителя при температуре 85 °С.

Заключение

Разработана методика определения оптимальной температуры введения антиокислительных присадок в базовую дисперсионную среду пластичных смазок. Показано, что для рапсового масла оптимальная температура введения антиокислительной присадки ДФА, обеспечивающей комплекс наилучших функциональных показателей, составляет 85 °С. Разработанная методика может быть использована для оптимизации иных технологических параметров в процессах модификации смазочных параметров.

Благодарности

Работа частично выполнена в рамках ГПНИ «8. Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «8.4. Многофункциональные и композиционные материалы» задания № 4.2.3 НИР 1, и при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ T22BA-003).

[1] Фукс И.Г. Изменения в смазочных материалах при температурном воздействии в процессе их производства и применения / И.Г. Фукс, О.Э. Гар // Тематический обзор. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. – 53 с.

[2] Григорьев Ф.А., Гуцев Д.М., Ковалёва И.Н., Мышкин Н.К. Использование антиокислительной присадки к дисперсионной среде из растительного сырья для пластичных смазочных материалов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции ПОЛИКОМТРИБ-2022. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2022. – С. 60.

[3] Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 176 с.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ MoS_x, ФОРМИРУЕМЫХ РЕАКЦИОННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

Грицкевич М.Д. *, Фоминский В.Ю., Романов Р.И. Фоминский Д.В.

*E-mail: mgritskevich@yandex.ru

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия.

В работе получены и всесторонне исследованы твердосмазочные покрытия на основе нанокристаллических пленок MoS_x. Для нанесения тонкопленочных покрытий такого типа впервые использован метод реакционного импульсного лазерного осаждения молибдена в сероводороде. Варьирование давления H₂S, температуры подложки (250-350 °C) и введение легирующих примесей (Ti) позволило изучить влияние ряда важных факторов на структурное и химическое состояния покрытий и их трибологические свойства при испытаниях во влажном воздухе, азоте и повышенных температурах (до 250 °C).

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, импульсное лазерное осаждение, коэффициент трения скольжения, износ.

Введение

Твердосмазочные покрытия приобретают всё большую популярность за счёт своих высоких антифрикционных свойств. Подобные покрытия могут применяться в высокотехнологичных отраслях промышленности, где существуют особые требования к энергосбережению и износостойкости материалов: работа при высоких или низких температурах, при высоких контактных напряжениях и т.д.

Халькогениды переходных металлов (ХПМ), как основа для твердосмазочных антифрикционных покрытий, являются перспективными материалами для исследователей из-за низкого коэффициента трения в различных условиях эксплуатации, в том числе и экстремальных [1]. Хотя данные плёнки исследуются несколько десятков лет, всё ещё ведутся поиски в области повышения износостойкости твердосмазочных покрытий в условиях низких и высоких температур, высоких нагрузок и различных средах.

Цель работы заключалась в исследовании особенностей трения скольжения стального контртела по покрытиям MoS_x, полученных методом реакционного импульсного лазерного осаждения (РИЛО) молибдена в сероводороде.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MoS_x COATINGS FORMED BY REACTIVE LASER DEPOSITION

Gritskevich M.D., Fominski V.Yu., Romanov R.I., Fominski D.V.

In this work, solid lubricant coatings based on nanocrystalline MoS_x films have been obtained and comprehensively studied. For the deposition of thin-film coatings, the method of reactive pulsed laser deposition of molybdenum in hydrogen sulfide was used for the first time. Variation of the H₂S pressure, substrate temperature (250-350 °C) and the introduction of dopants (Ti) made it possible to study the influence of several important determining factors on the structural and chemical state of coatings and their tribological properties when tested in humid air, nitrogen and elevated temperatures (up to 250 °C).

Keywords: solid lubricant coatings, pulsed laser deposition, coefficient of sliding friction, wear.

Применение этого метода открывает новые интересные возможности гибкого регулирования структурного и химического состояния покрытий на основе сульфида молибдена [2,3], и как следствие установление новых важных корреляционных зависимостей трибологических свойств этих покрытий в различных условиях от структурно-фазовых характеристик и состава покрытий.

Материалы и методы исследований

Покрытия наносились на кремниевые подложки, нагретые до температуры 250-350 °C. Абляция мишени из чистого Mo осуществлялась при помощи лазера фирмы «Solar» (Беларусь), с длиной волны 1064 нм. Частота следования импульсов составляла 25 Гц, энергия излучения – до 90 мДж. В зоне облучения мишени после фокусировки излучения лазерный флюенс составлял примерно 20 Дж/см², что позволяло минимизировать образование капель при абляции. После откачки камеры осаждения до давления 10⁻⁴ Па в нее напускался сероводород. Давление сероводорода составляло 9 и 18 Па. Лазерный луч падал под углом 45° к поверхности мишени и перемещался по ней с помощью системы автоматического сканирования. Время осаждения составило 15 мин. Толщина покрытий не превышала 200 нм. В ряде случаев

рядом с мишенью Mo устанавливалась мишень Ti, что позволяло получать при 250 °С легированные покрытия MoS_x(Ti).

Трибоиспытания покрытий проводились на приборе Anton Paar TRB3 в режиме возвратно-поступательного скольжения стального шарика (100Cr6) диаметром 3 мм при нагрузке 1 Н. Максимальная скорость скольжения составляла 1 см/с. Испытания проводились в трёх режимах: на воздухе с относительной влажностью ~49%, на воздухе при температуре 250 °С и в атмосфере азота (относительная влажность N₂-содержащей среды не превышала 9%). Структура покрытий до и после трибоиспытаний была изучена при помощи микро-рамановской спектроскопии (MPC). Спектры были получены при помощи спектрометра LabRam Evolution (532 нм). Параметры лазерного пучка были подобраны таким образом, чтобы избежать структурных изменений в покрытиях.

Результаты исследований и их обсуждение

Метод реакционного ИЛО для создания покрытий MoS_x позволяет избежать осаждения частиц микронных и субмикронных размеров на покрытия при абляции мишени Mo, что обуславливает формирование достаточного однородного и плотного покрытия с гладкой поверхностью. MPC исследования показали, что при выбранных режимах осаждения формировалась кристаллическая структура 2H-MoS₂. Совершенство структуры ухудшалось при повышении температуры до 350 °С. Давление сероводорода не оказывало существенного влияния на совершенство атомной упаковки фазы 2H-MoS₂. Легирование титаном не вызывало изменений на спектрах MPC созданных покрытий.

На рис. 1а,б,в показаны зависимости коэффициента трения от числа циклов скольжения контртела для ряда созданных покрытий в трёх различных условиях испытаний. Испытания заканчивались после 10³ циклов скольжения. Характерные микрофотографии треков и контртела после испытаний покрытия MoS₂, осажденного при 350 °С показаны на рис. 2 (а), (б) и (в). Видно, что характер поведения покрытия при различных трибоиспытаниях значительно различается.

Наихудшие антифрикционные свойства обнаружены для покрытия при испытаниях на влажном воздухе, что связано с чувствительностью ХПМ к парам воды. В свою очередь, это может быть обусловлено оборванными или ненасыщенными связями на краю базисных плоскостей, реагирующими с влагой и кислородом в окружающей среде с образованием продуктов трибоокисления, таких как MoO₃ [4,5].

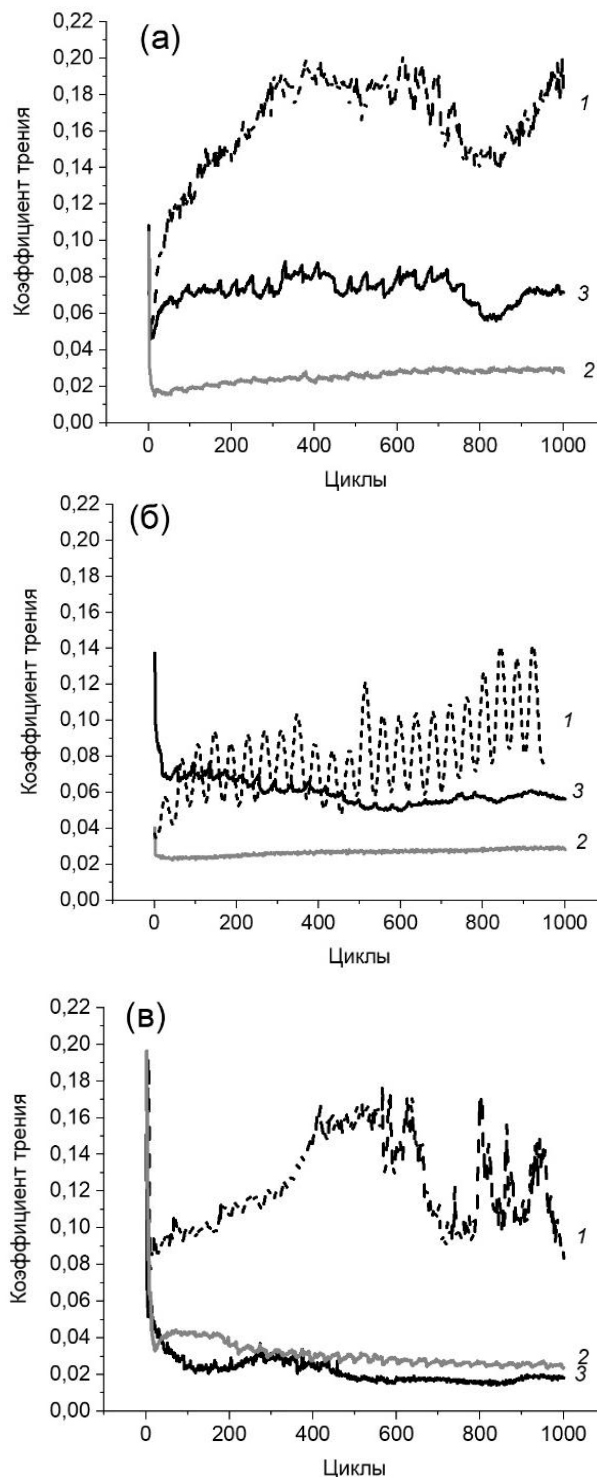


Рис. 1. Изменение среднего коэффициента трения при увеличении циклов скольжения контртела по покрытиям MoS₂, полученным при нагреве подложки до (а) 250° и (б) 350°С; и (в) для MoS_x(Ti) (б). Измерения проводились во влажном воздухе (кривая 1); атмосфере азота (2) и на воздухе при температуре 250 °С (3).

При испытаниях покрытия во влажном воздухе, заметен постепенный рост коэффициента трения, с максимальным значением ~ 0,18. Износ в данных условиях протекал довольно интенсивно – трек износа имел ширину примерно 128 мкм, по краям трека были вынесены частички покрытия,

образовавшимися в результате трения. В некоторых местах покрытие изнашивалось до подложки. Контртело так же подвергалось значительному износу – диаметр контактной области достигал 174 мкм.

Покрытие проявляло относительно хорошие антифрикционные свойства во время испытаний на воздухе при температуре +250 °С. Приработка покрытия составляла около 400 циклов (рис. 1), после чего устанавливался относительно стабильный коэффициент трения 0,058-0,068.

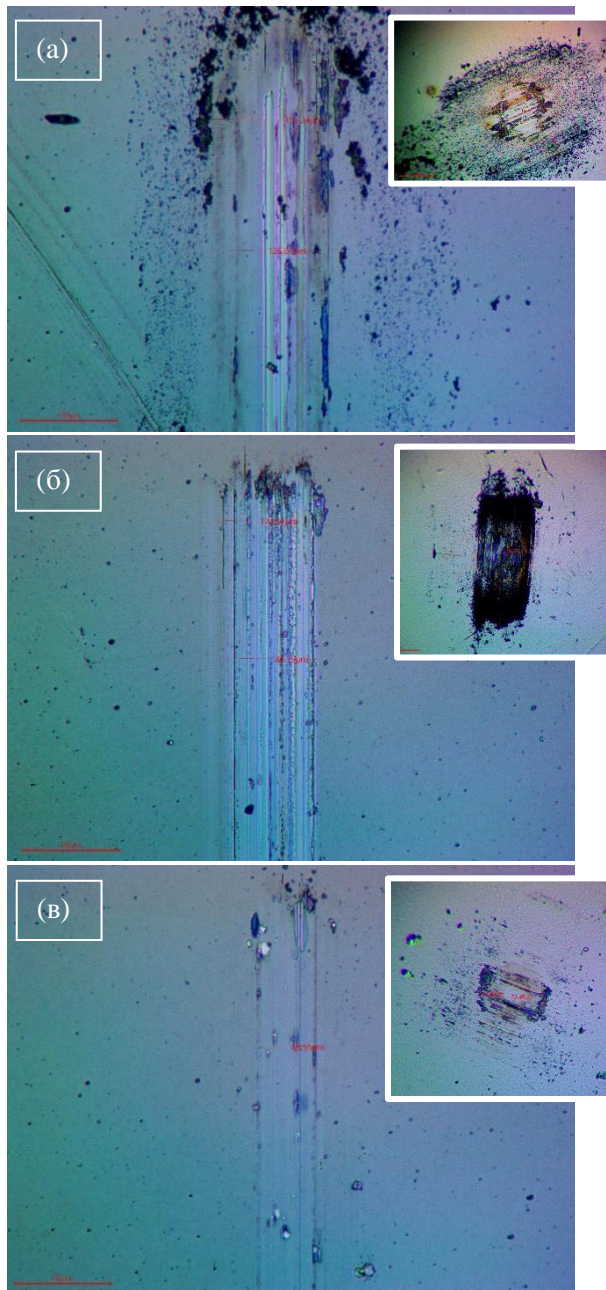


Рис. 2. Микрофотографии треков износа, образовавшихся после трибологических испытаний покрытия MoS₂, полученного при нагреве подложки до 350 °С: а – во влажном воздухе; б – на воздухе при температуре +250 °С; в – в атмосфере азота (на вставках представлены изображения областей контакта на контртеле после испытаний)

Покрытие подвергалось слабому износу (рис. 2б), хотя общая ширина трека составила примерно 86 мкм, в отдельном месте, это значение достигало 124 мкм. В то же время происходил значительный износ контртела, с диаметром контактной области 121 мкм.

Наилучшие трибологические свойства проявились при испытаниях в атмосфере азота, когда коэффициент трения не превышал 0,029. Трек износа слабо выделялся на фоне исходного покрытия. Контактное пятно на контртеле не превышало 70 мкм.

Осаждение при температуре подложки равной 250 °С не способствовало в целом улучшению антифрикционных свойств (рис. 1а). Однако легирование такого покрытия титаном вызвало заметное улучшение свойств. Особенно это проявилось при испытаниях на воздухе при повышенной температуре. Коэффициент трения при этом составлял 0,015, что оказалось меньше даже чем коэффициент трения в азоте (0,025).

На рис. 3 приведены МРС спектры покрытий до трибоиспытаний в различных средах.

Можно отметить, что спектры отличаются друг от друга интенсивностью пиков и незначительным изменением в положении. В области MoS₂ наблюдается два пика – 370 см⁻¹ и 405 см⁻¹, относящихся к модам 1-го порядка E_{2g}¹ и A_{1g}, соответственно. Мода E_{2g}¹ связана с вибрацией атомов Mo и S, в то время, как мода A_{1g} связана с колебанием атомов S от атома Mo в обоих направлениях слоя MoS₂.

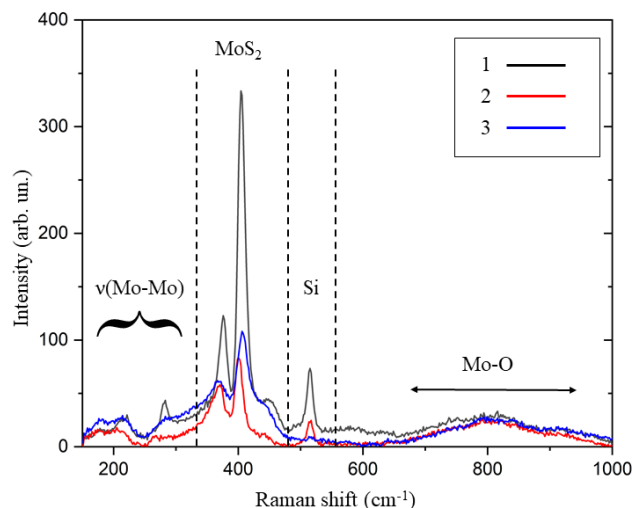


Рис. 3. МРС спектры покрытий MoS₂, полученных при нагреве подложки до (1) 250° и (2) 350°С; и (3) для MoS_x(Ti)

По пикам первого и второго порядка MoS₂ можно судить о неупорядоченности в покрытии и размере наночастиц. Разупорядочение в плёнках

MoS₂ и уменьшение размера наночастиц приводит к уширению пиков E_{2g}¹ и A_{1g}.

Положения пиков и их ширина зависят от температуры – при её повышении, положения пиков смещаются влево, что соотносится с экспериментальными данными: пики E_{2g}¹ и A_{1g} находятся на 376,4 см⁻¹ и 405,5 см⁻¹ для покрытия MoS₂, полученного при нагреве подложки до температуры +250 °С, и 370,5 см⁻¹ и 400,5 см⁻¹ для покрытия MoS₂, полученного при нагреве подложки до температуры +350 °С, соответственно.

Выводы

Реактивное импульсное лазерное осаждение тонкопленочных покрытий на основе сульфида молибдена на нагретые подложки позволяет получать плотные и гладкие покрытия с кристаллической 2H-MoS₂. Структурное состояние и свойства покрытий зависят от температуры подложки, давления сероводорода и легирования титаном. Повышение температуры до 350 °С оказывает положительное влияние на трибологические свойства при различных условиях испытаний. Применение титана позволяет значительно улучшить свойства покрытий, осаждаемых при более низкой температуре (250 °С).

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского Научного Фонда (номер проекта 19-19-00081).*

- [1] Vazirisereshk M.R., Martini A., Strubbe D.A., Baykara M.Z. Solid Lubrication with MoS₂: A Review // Lubricants. – 2019. – V. 7. – P. 57.
- [2] Fominski V. Yu., Nevolin V. N., Fominski D. V., Romanov R. I. and Gritskevich M. D. Influence of the Chemical Composition and Local Atomic Packing of Nanostructured MoS_x and MoSe_x Solid Lubricant Coatings on Their Tribological Properties under Complicated Conditions // Technical Physics Letters. – 2020. – V. 46. – №. 1. – P. 83–86.
- [3] Fominski V., Demin M., Nevolin V., Fominski D., Romanov R., Gritskevich M. and Smirnov N. Reactive Pulsed Laser Deposition of Clustered-Type MoS_x (x ~ 2, 3, and 4) Films and Their Solid Lubricant Properties at Low Temperature // Nanomaterials. – 2020. – V. 10. – №. 653. – P. 1–21.
- [4] Vuchkov T., Yaqub T. B., Evaristo M., Cavaleiro A. Synthesis, Microstructural, and Mechano-Tribological Properties of Self-Lubricating W-S-C(H) Thin Films Deposited by Different RF Magnetron Sputtering Procedures // Coatings. – 2020. – V. 10. – № 272. – P. 1–20.
- [5] Prajapati A.K., Omrani E., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Fundamentals of Solid Lubricants // Springer-Verlag GmbH Germany. – 2018. – pp. 32

ЛИНЕЙНАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ТРИБОДЕФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ДЕТАЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Густов Ю.И., Воронина И.В.*

*E-mail: VoroninaIV@mgsu.ru

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

Представлена линейная гармоническая аппроксимация трибодеформационного упрочнения и разупрочнения поверхностей трения деталей строительной техники различного назначения. В отличие от апробированной степенной зависимости с применением отношения парциального микрометалла и микроизноса предлагается линейная зависимость с использованием только парциального микрометалла с гармоническими коэффициентами пропорциональности системы золотой пропорции. Проверка степеней упрочнения (разупрочнения) на примере ножей дорожной фрезы, модельных шарниров рабочего оборудования гидравлического экскаватора и дробящих плит щековой дробилки показала адекватность исходных и расчетных характеристик трибодеформации поверхностей. Отличается большая оперативность расчета по предложенному выражению.

Ключевые слова: аппроксимация, трибодеформация, строительная техника, микрометалл, микроизнос, золотая пропорция, ножи, шарниры, дробящие плиты.

Введение

При трении и изнашивании различных деталей машин и оборудования активные приповерхностные слои испытывают трибодеформационное упрочнение или разупрочнение. Степени изменения исходных прочностных свойств оказывают влияние на износостойкость поверхностей трения. Оптимальным случаем представляется неизменность исходных показателей, когда проявляется квазидинамическое равновесие процесса трения и изнашивания.

Применительно к рабочим органам дорожной фрезы [1], модельным шарнирам [2], дробящим плитам щековой дробилки [3] и другим изделиям [4] применена проверенная экспериментально зависимость трибодеформационного упрочнения (разупрочнения):

$$K_s = H_s / H_0 = (D_{my} / D_m)^{D_m / D_a}, \quad (1)$$

где H_0 – начальная (технологическая) твердость,

USING THE LINEAR HARMONIC APPROXIMATION OF THE TRIBO-DEFORMATION PROCESS OF CONSTRUCTION EQUIPMENT PARTS

Gustov Yu.I., Voronina I.V.

A linear harmonic approximation of tribo-deformation hardening and softening of friction surfaces of parts of construction equipment for various purposes is presented. In contrast to the proven power-law dependence using the ratio of partial micrometal and microwear, a linear dependence is proposed using only partial micrometal with harmonic proportionality coefficients of the golden ratio system. Checking the degrees of hardening (softening) on the example of road milling knives, model hinges of the working equipment of a hydraulic excavator and crushing plates of a jaw crusher showed the adequacy of the initial and calculated characteristics of tribological deformation of surfaces. There is a great efficiency of calculation according to the proposed expression.

Keywords: approximation, tribo-deformation, construction equipment, micrometal, microwear, golden ratio, knives, hinges, crushing plates.

H_s – поверхностная (трибокинетическая) микро-твердость; D_m , D_a – парциальные микрометалл (для выступов) и микроизнос (для впадин) в пределах базовой поверхности трения; $D_{my} = 0,618$ – гармоническое значение парциального микрометалла в системе золотой пропорции [5].

Фактические значения D_m и D_a определяются по нормализованной системе относительных опорных линий t_{pp} и сближений ϵ по отношению отрезков [6,7]

$$D_a = C_a P / C_a C_m = C_a P / L_\beta, \quad (2)$$

$$D_m = C_m P / C_a C_m = C_a P / L_\beta, \quad (3)$$

где L_β – длина бицентроиды – расстояние от центров тяжести микроизноса C_a и микрометалла C_m .

Для указанных выше объектов исследования получены расчетные значения K_s по (1), подтвержденные экспериментально.

Научный и практический интерес представляет установление обобщающей линейной гармонической зависимости, выраженной только через парциальный микроизнос D_a , что упрощает и ускоряет расчеты.

Цель работы – линейная аппроксимация трибодетформационного процесса упрочнения (разупрочнения) трущихся деталей.

Методика исследования

На основе экспериментально-расчетных значений и соответствующих величин парциального микроизноса трибодетформационного упрочнения ($K_S > 1$) и разупрочнения ($K_S < 1$) строится обобщенная диаграмма $= f(D_a)$.

Результаты исследования

Полученная обобщенная зависимость аппроксимируется линейной функцией вида

$$K_s = 0,618(1 + 1,9D_a), \quad (4)$$

где 0,618 и 1,9 – гармонические коэффициенты золотой пропорции: $1,9 = 0,5 (1,8866 + 1,9416)$; $1,8866 = 1 + 0,618^{0,25}$; $1,9416 = 1 + 0,618^{0,125}$.

В таблице 1 приведено сравнение исходных по (1) и расчетных по (4) значений K_S поверхностей трения ножей дорожной фрезы, наплавленных различными материалами.

Табл. 1. Исходные (K_s) и расчетные (K_{sp}) трибодетформационные показатели наплавленных ножей дорожной фрезы

Материал	D_a	K_S по (1)	K_{sp} по (4)	Δ , %
И-1	0,68	1,363	1,416	3,89
Э-1	0,64	1,355	1,369	1,03
ЦН-16	0,54	1,286	1,252	2,64
СКБ	0,60	1,336	1,323	0,97
Т-620	0,38	0,995	1,064	6,93
КБХ-45	0,35	0,911	1,029	12,95
Х-5	0,34	0,910	1,017	11,76
ПЛ-400 38ГЗРТЮ	0,49	1,221	1,193	2,29

По результатам таблицы 1 можно сформулировать следующие основные выводы

1. Для упрочняющихся наплавленных поверхностей (И-1, Э-1, ЦН-16, СКБ и ПЛ-400Х38ГЗРТЮ) расхождение между начальными и расчетными значениями трибодетформационного упрочнения составляет $\Delta=0,97-3,89\%$ при среднем незначительном отклонении $\Delta=2,16\%$.

2. Для разупрочняющихся поверхностей ($K_S < 1$) расчет по выражению (4) показывает незначительные степени упрочнения ($K_{sp} > 1$): расхождение составляет $\Delta=6,93-12,95\%$ при среднем

$\Delta=10,5\%$. Для наплавов Т-620, КБХ-45 и Х-5 карбидного класса характерно квазидинамическое равновесие ($H_0/H_S = K_S \approx 1,0$), что и отражает формула (4).

3. Использование в выражении (4) уточненного коэффициента $1,786=(1+0,618^{0,5})$ показывает сходимость начальных и расчетных значений трибодетформационного упрочнения: расхождение между ними незначительно и составляет $\Delta=0,0-5,93\%$ при среднем $\Delta=2,53\%$. Принятие этого коэффициента показывает и расхождение с начальными разупрочняющимися наплавками в более узких пределах $\Delta=4,24-10,2\%$, при этом для наплавки Х-5 подтверждается разупрочнение поверхности ($K_{sp}=0,993$ при $K_S=0,91$).

4. Принятые в выражении (4) коэффициента пропорциональности равным 1,618 приводит к согласованию с начальными значениями ($K_S < 1$) при расхождении при среднем $\Delta=3,14\%$, а также со значениями ($K_S > 1$) при расхождении $\Delta=5,0-11,0\%$ при среднем отклонении $\Delta=8,24\%$.

Таким образом, принято в выражении (4) коэффициента пропорциональности равным 1,618 согласует степени упрочнения и разупрочнения наплавленных металлов. На этом основании принято выражение

$$K_s = 0,618(1 + 1,618D_a). \quad (5)$$

В таблице 2 предоставлены начальные по (1) и расчетные по (5) величины K_S поверхностей трения шарнирных пальцев (П1.1 –П4.8) и втулок (В1-В8) рабочего оборудования гидравлического экскаватора.

Табл. 2. Исходные и расчетные трибодетформационные показатели шарнирных пальцев и втулок

Деталь	D_a	K_S по (1)	K_{sp} по (5)	Δ , %
П1.1	0,613	1,3438	1,231	9,16
П1.2	0,489	1,2198	1,107	10,19
П2.3	0,427	1,1068	1,045	5,91
П2.4	0,549	1,2954	1,167	11,0
П3.5	0,417	1,0849	1,035	4,82
П3.6	0,595	1,3352	1,213	10,0
П4.7	0,433	1,1194	1,051	6,51
П4.8	0,537	1,2827	1,155	11,0
В1	0,391	1,023	1,01	1,29
В2	0,375	0,981	0,993	1,22
В3	0,363	0,948	0,981	3,48
В4	0,347	0,902	0,965	6,98
В5	0,346	0,899	0,964	7,23
В6	0,368	0,962	0,986	2,49
В7	0,374	0,979	0,992	1,33
В8	0,350	0,911	0,968	6,25

По результатам таблицы 2 можно сделать следующие выводы

1. Для упрочняющихся пальцев исходные по (1) и расчетные по (5) степени трибодформационного упрочнения практически совпадают: расхождение находится в пределах $\Delta=4,82-11,0\%$ при среднем отклонении $\Delta=8,57\%$.

2. Для втулок установлено соответствие начальных и расчетных степеней упрочнения (для втулки В1) и разупрочнения соответственно с незначительными расхождениями $\Delta=1,29\%$ и $\Delta=1,22-7,23\%$ при среднем отклонении $\Delta=4,14\%$.

3. На основании пунктов 1 и 2 уточненная зависимость (5) качественно и количественно согласуется с апробированной формулой (1), отличаясь оперативностью и простотой расчетов.

В таблице 3 даются результаты расчетов по выражениям (1) и (5) для наплавленных дробящих плит щековой дробилки с использованием парциальных величин D_a , полученных на входе, в середине и на выходе дробящей плиты.

Табл. 3. Показатели упрочнения и разупрочнения плит

Материал	D_a	K_S по (1)	K_{SP} по (5)	$\Delta, \%$
ВСН-11	0,479	1,204	1,097	9,75
ВСН-8	0,417	1,085	1,035	4,83
Т-620	0,427	1,107	1,045	5,93
ВСН-8	0,579	1,322	1,20	10,2
ВСН-8	0,365	0,954	0,983	3,04
Т-620	0,408	1,034	1,026	0,780
ЭН-60М	0,529	1,331	1,147	16,0
ЭН-60М-3	0,464	1,179	1,082	8,96
ВСН-6	0,331	0,852	0,949	11,38
ВСН-9	0,561	1,31	1,18	11,0
ЭН-60М	0,532	1,277	1,15	10,52
ВСН-8	0,434	1,21	1,052	6,56

На основании полученных результатов формулируются следующие выводы

1. Для произвольной выборки материалов рабочих зон дробящей плиты и направления профилографирования (продольное и поперечное) расчет по выражению (5) во всех случаях вполне удовлетворительно согласуется с начальными значениями K_S по (1).

2. В случаях трибодформационного упрочнения расхождение составляет $\Delta=0,78-16,0\%$ при среднем отклонении $\Delta=8,45\%$, при разупрочнении расхождения находятся в пределах $\Delta=3,04-11,38\%$ при среднем $\Delta=7,21\%$.

Заключение

Линейная гармоническая аппроксимация трибодформационного процесса деталей строительных машин и оборудования с различными коэффициентами парциального микроизноса показала, что качественное и количественное соответствие экспериментальным показателям упрочнения и разупрочнения обеспечивает выражение с гармоническим коэффициентом $K_\gamma=1,618$. Расчет по этой зависимости характеризуется простотой, оперативностью и достоверностью трибодформационных показателей. На этом основании установленное выражение рекомендуется для практического применения.

[1] Густов Ю.И., Ципурский И.Л. Исследование эксплуатационных показателей ножей дорожной фрезы с шарнирными лопатками // Приводы и компоненты машин. – 2019. – №1-2. – С. 24-27.

[2] Густов Ю.И., Шишков П.Е. Исследование трибомеханических параметров поверхностей трения рабочего оборудования гидрокскаватора // Подъемно-транспортное дело. – 2019. – № 6. – С. 2-5.

[3] Густов Ю.И., Воронина И.В. Триботехнические показатели рабочих органов и сопряжений строительной техники // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 9. – С. 28-34.

[4] Степанов М.А., Цибиков Я.И. Анализ работоспособности автомобильного гидравлического подъемника // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78. – № 11. – С. 9-12.

[5] Золотая пропорция и проблемы гармонии систем: Учеб. пособие для студентов техн. спец. вузов / В. И. Коробко. – М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 1998. – 372 с

[6] Крагельский И.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / И.В. Крагельский, В.В. Алисин. – М: Машиностроение, 1978. – 400 с.

[7] Абрамов В.В., Ракунов Ю.П. Управление процессом выглаживания плоских металлических поверхностей сапфировым инструментом // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78. – № 11. – С. 44-49.

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АНТИФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВМПЭ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОБАВОК

¹Данилова С.Н. *, ¹Васильев А.П., ^{1,2}Дьяконов А.А., ¹Оконешникова А.В.,
¹Макаров И.С., ¹Охлопкова А.А.

*E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

¹ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия;

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния функциональных добавок на трибологические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). В качестве функциональных добавок использованы органические наполнители, такие как: 2-меркаптобензтиазол (МБТ), дифенилгуанидин (ДФГ), сульфенамид Ц (СБС), борполимер (БП). Установлено, что введение органических наполнителей в СВМПЭ приводит к снижению скорости массового изнашивания без повышения коэффициента трения. Исследование поверхности трения выявило формирование новой износостойкой структуры, так называемой вторичной структуры. Методом ИК-спектроскопии выявлено, что введение МБТ, СБС и БП приводит к снижению продуктов трибоокисления.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, 2-меркаптобензтиазол, дифенилгуанидин, борполимер, сульфенамид Ц.

Введение

В последние годы полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще используются в качестве конструкционного материала в машиностроении. В свою очередь, развитие техники, машин и механизмов в узлах трения требует разработки новых подходов к конструированию фрикционных материалов [1]. В частности, одним из перспективных антифрикционных полимерных матриц является сверхвысокомолекулярный полиэтилен, что обусловлено его низким значением коэффициента трения и относительно высокой износостойкостью по сравнению с другими полиолефинами [2]. В машиностроительных материалах предъявляются высокие требования к разрабатываемым материалам, которые при эксплуатации способны адаптироваться к жестким условиям трибосопряжения [3]. Одним из методов получения ПКМ с заданными свойствами является введение

DEVELOPMENT OF COMPOSITE MATERIALS FOR ANTI-FRICTION PURPOSE BASED ON UHMWPE AND FUNCTIONAL ADDITIVES

Danilova S.N., Vasiliev A.P., Dyakonov A.A., Okoneshnikova A.V., Makarov I.S., Okhlopkova A.A.

This paper presents the results of studies of the effect of functional additives on the tribological properties of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE). Organic fillers were used as functional additives, such as: 2-mercaptobenzothiazole (MBT), diphenylguanidine (DPG), sulfenamide C (CBS), borpolymer (BP). It has been established that the introduction of organic fillers leads to a decrease in the wear rate without an increase in the friction coefficient. The study of the friction surface revealed the formation of a new wear-resistant structure, the so-called secondary structure. IR spectroscopy revealed that the introduction of MBT, CBS, and BP leads to a decrease in tribooxidation products.

Keywords: polymer composite material, ultra-high molecular weight polyethylene, 2-mercaptobenzthiazole, diphenylguanidine, boron polymer, sulfenamide C.

функциональных наполнителей и использование новых технологий изготовления. Обычно наполнителями служат неорганические микро- и нано-размерные наполнители [4]. Однако, применение неорганических наполнителей ограничено абразивным влиянием на контртело, сопутствующий при скольжении в условиях сухого трения. Это приводит к повышению термического напряжения в зоне контакта и коэффициента трения, несовместимости со смазочными материалами и низкой адгезии к полимеру, что вызывает отрывание жестких частиц и их дальнейшее участие в абразивном изнашивании [5]. В качестве альтернативы данной проблемы в этой работе предлагается использовать пластифицирующие добавки. Предполагается, что «мягкие» наполнители могут участвовать в ориентационных эффектах с формированием пленки переноса в зоне контакта, тем самым облегчаются процессы релаксации и скольжения при трении. Для этой цели в качестве

модификаторов СВМПЭ использовали органические наполнители: МБТ, ДФГ, CBS и БП.

Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы для композитов использовали СВМПЭ марки GUR 4022 (Celanese, Китай) с молекулярной массой 5 млн. г/моль. В качестве наполнителей выступают органические функциональные добавки (МБТ, ДФГ, CBS и БП), которые часто используются в резинотехнической промышленности.

ПКМ изготавливали методом горячего прессования при следующих условиях: $T=175\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=10\text{ МПа}$, $t_{\text{выдержки}}=20\text{ мин}$.

Прочность при сжатии исследовали в универсальной машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония) согласно ГОСТ 4651.

Трибологические исследования проводили на трибометре UMT-3 (СЕТР, США) согласно схеме трения «палец-диск». Исследование проводили при удельной нагрузке 1,9 МПа и при скорости трения 0,5 м/с в течение 3 ч. Для исследования использовали образцы с диаметром $10\pm 0,05\text{ мм}$ и высотой $20,0\pm 1,0\text{ мм}$. В качестве контртела выступает стальной диск марки #45, который характеризуется твердостью 45–50 HRC и шероховатостью $R_a=0,06\text{--}0,08\text{ мкм}$.

Морфологию поверхности трения исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) микроскопе JSM-7800F (Jeol, Япония) в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 1,0 – 1,5 кВ.

ИК-спектры (ИКС) поверхностей трения получали на ИК-спектрометре Varian 7000 FT-IR (Varian, США) с применением приставки полного внутреннего отражения.

Результаты и обсуждение

Известно, что для деталей узлов трения необходимы высокие показатели механических характеристик, в частности, предел прочности определяет несущую способность и играет немаловажную роль в изменении параметров поверхности трения [6, 7]. Поэтому целесообразно было провести исследование прочности при сжатии ПКМ в зависимости от содержания и природы наполнителя, результаты представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, при введении функциональных добавок наблюдается увеличение предела прочности при сжатии. Максимальные значения прочности наблюдаются у ПКМ, содержащих БП и CBS. Установлено, что прочность при сжатии при относительной деформации 10% и 25 % у композита СВМПЭ/CBS увеличивается на 38-39 % по сравнению с исходным полимером. В

случае введения БП выявлено увеличение прочности при сжатии при 10 % установленной деформации на 33 % относительно ненаполненного СВМПЭ. Однако, прочность при сжатии при 25 % установленной деформации увеличивается незначительно. Прочность при сжатии композитов с остальными наполнителями (МБТ и ДФГ) находятся в пределах значений исходного полимера.

Результаты трибологических исследований СВМПЭ и ПКМ в зависимости от содержания и вводимого наполнителя приведены на рис. 2.

На основании трибологических исследований установлено, что введение функциональных добавок в СВМПЭ не приводит к изменению коэффициента трения при заданных условиях испытания. Однако, выявлено существенное снижение скорости массового изнашивания при введении CBS (0,02 мг/ч.), которая в 6 раз ниже по сравнению с исходным СВМПЭ. Также, наблюдается снижение скорости массового изнашивания в 3 раза у композита СВМПЭ/МБТ. В случае введения ДФГ и БП зафиксировано незначительное повышение износостойкости, однако у композита СВМПЭ/ДФГ наблюдается повышение скорости массового изнашивания при увеличении содержания наполнителя до 1 мас. %.

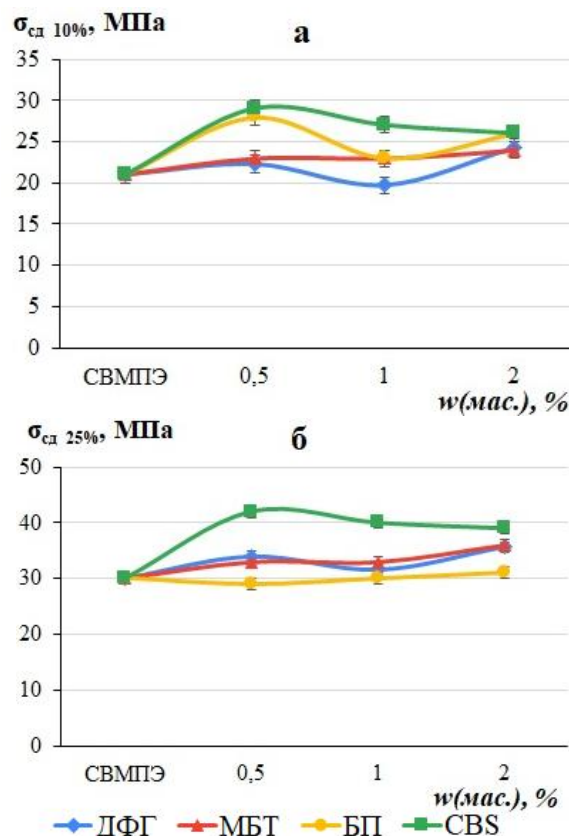


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии ПКМ от наполнителя: (а) – при относительной деформации 10%; (б) – при относительной деформации 25 %

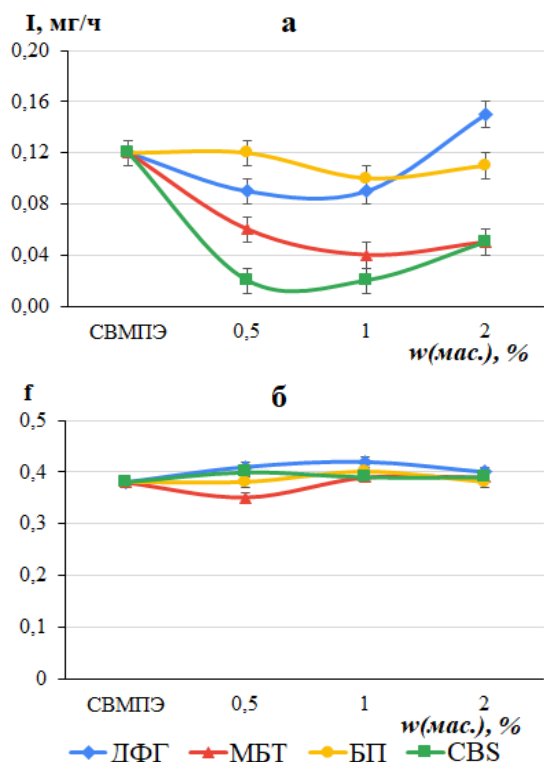


Рис. 2. Результаты трибологических исследований: (а) коэффициент трения и (б) скорость массового изнашивания

Таким образом, прочность при сжатии коррелирует с износостойкостью ПКМ. Так, наибольшими значениями прочности при сжатии и высокой износостойкостью характеризуется композит, наполненный CBS. В случае композита СВМПЭ/БП отличие можно объяснить тем, что частицы БП, как более твердый наполнитель по сравнению с CBS, МБТ, ДФГ, в процессе изнашивания могут вытесняться на поверхности, затем расплавиться в зоне контакта и активно участвовать в трибохимических процессах.

Для объяснения полученных результатов провели исследования поверхностей трения СВМПЭ и ПКМ методами СЭМ и ИКС.

ИК-спектры поверхностей трения СВМПЭ и ПКМ приведены на рис. 3. Показано, что во всех композитах наблюдаются интенсивные пики при 2912, 2341 и 1468 см^{-1} , которые относятся валентным и деформационным колебаниям $-\text{CH}_2$ связи СВМПЭ, а также пик при 717 см^{-1} соответствует маятниковым колебаниям полимерной цепи [8].

На ИК-спектрах СВМПЭ и ПКМ зафиксировано наличие полосы поглощения в области 1760-1500 см^{-1} , характеризующий наличие кислородсодержащего соединения – карбоксильной группы. Данная полоса поглощения в этой области вызвана из-за трибоокисления СВМПЭ в процессе изнашивания. В композитах с МБТ, БП и CBS

наблюдается снижение интенсивности приведенной полосы поглощения, что свидетельствует об ингибировании окислительных реакций. При введении ДФГ, интенсивность полосы поглощения кислородсодержащих групп идентичен с пиком исходного СВМПЭ. ИК-спектры композитов отличаются появлением пиков малой интенсивности в диапазоне 1000-1200 см^{-1} , которые обусловлены наличием бензольного кольца и различных функциональных групп наполнителей.

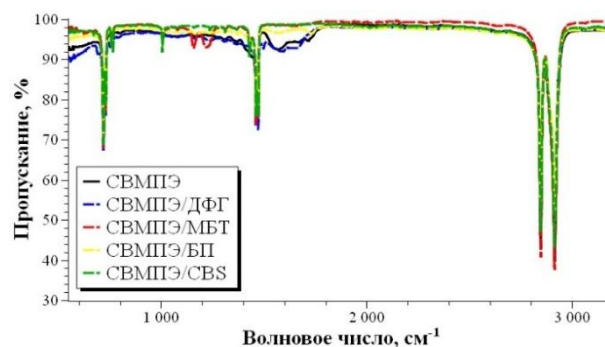


Рис. 3. ИК-спектры поверхности трения СВМПЭ и ПКМ

Далее провели исследования поверхностей трения методом СЭМ, микрофотографии представлены на рис. 4. На поверхности трения исходного СВМПЭ видно наличие бороздок (канавок), ориентированных по направлению трения, что вызвано абразивным изнашиванием (микрорезанием) пластичного материала поверхностью стального контртела.

В случае введения функциональных добавок в СВМПЭ морфология поверхности трения трансформируется. Так, поверхность трения ПКМ, содержащего ДФГ и БП, отличается наличием напылов, что свидетельствует об сильной деформируемости материалов при трении. Эти композиты характеризуются незначительным увеличением износостойкости.

Показано, что на поверхности трения композита, наполненного МБТ и CBS, наблюдается формирование упорядоченных структур вдоль направления трения. При трении формируются вторичные структуры – кластеры из частиц наполнителя, которые образуют экранирующий слой, облегчающий скольжение материала. Формирование вторичных структур является одним из ключевых адаптационных механизмов ПКМ к внешней нагрузке трения. Так, у этих композитов поверхность трения визуально наиболее гладкая и менее шероховатая по сравнению с остальными ПКМ, т.е. снижается адгезионная составляющая трения, что объясняет увеличение износостойкости при введении МБТ и CBS в СВМПЭ.

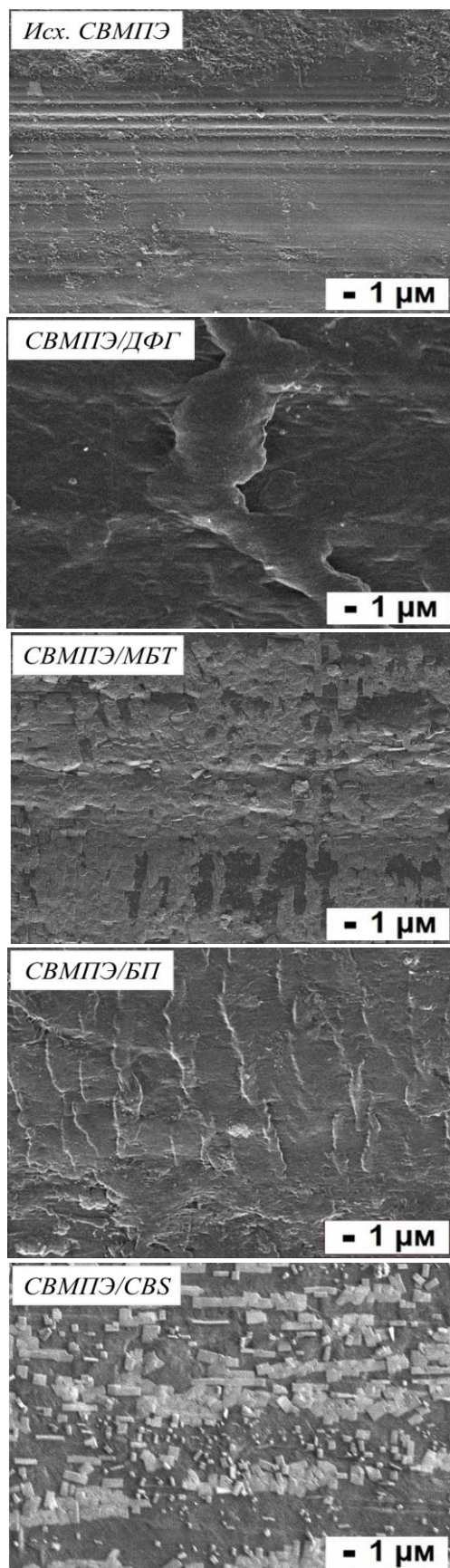


Рис. 4. Микрофотографии поверхностей трения СВМПЭ и ПКМ при увеличении $\times 3000$

Заключение

На основании проведенных исследований выявлено, что введение CBS является наиболее перспективным в качестве функциональной добавки для СВМПЭ. Композиты, содержащие CBS в концентрациях 0,5-2 мас. %, характеризуются максимальным повышением износостойкости в 6 раз и прочности при сжатии при относительной деформации 10 и 25 % на 38-39 % по сравнению с исходным полимером. Также, установлено повышение износостойкости композита СВМПЭ/МБТ в 3 раза. В то же время, композит СВМПЭ/БП отличается повышением прочности при сжатии (10 % деформации) на 33 % относительно исходного полимера. Отличие композита СВМПЭ/ДФГ можно объяснить сильной пластифицирующей действием наполнителя на полимерную матрицу, что не приводит к упрочнению и к повышению износостойкости.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 22-73-00076).

- [1] Kornopol'tsev V.N. et al. Use of ultrahigh-molecular-weight polyethylene for bearing materials on a steel substrate //Journal of Friction and Wear. – 2009. – Vol. 30. – №. 1. – P. 58-61.
- [2] Гоголева О. В. и др. Влияние способов смешения компонентов на свойства и структуру композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена //Трение и износ. – 2020. – Т. 41. – №. 1. – С. 50-54.
- [3] Panin S. et al. Role of micro- and nanofillers in abrasive wear of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene //Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications Ltd, 2014. – Vol. 1040. – P. 148-154.
- [4] Zhang H. et al. Preparation, mechanical and anti-friction performance of MXene/polymer composites //Materials & Design. – 2016. – Vol. 92. – P. 682-689.
- [5] Abdul Samad M. Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review //Polymers. – 2021. – Vol. 13. – №. 4. – P. 608.
- [6] Трибофизика: учеб. пособие / Ю.К. Машков, О.В. Малый; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 256 с.
- [7] Muhandes H. et al. Abrasive Sensitivity of Engineering Polymers and a Bio-Composite under Different Abrasive Conditions //Materials. – 2020. – Vol. 13. – №. 22. – P. 5239.
- [8] ИК спектры основных классов органических соединений / Б.Н. Тарасевич. – М: МГУ, 2012. – 55 с.

СТАТИЧЕСКАЯ ГРАДУИРОВКА ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ

Даровской Г.В. *, Поляков В.Н.

*E-mail: graffDAROVSKOI@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону, Россия.

Разработана методика статической градуировки прибора для измерения толщины смазочной пленки для машин трения типа «Амслер», в условиях высоких удельных давлений. Апробация прибора позволила установить отсутствие влияния различных присадок в жидком смазочном материале на его работу, обеспечиваются стабильные показания прибора с точностью $\pm 5\%$ в условиях малых и больших нагрузок.

Ключевые слова: машина трения, толщина смазочной пленки, пара трения «ролик-колодка», емкостной метод.

Введение

В настоящее время при проведении трибологических экспериментов широкое распространение получили машины трения типа «Амслер» (далее МТ), которые, ввиду своего несовершенства, многочисленными исследователями модернизируют [1]. Так, авторами для мониторинга толщины смазочной пленки в парах трения «ролик-колодка» и «ролик-ролик» был разработан прибор для измерения толщины смазочной пленки (далее ПИТП) [2], принцип которого основан на емкостном методе с применением генератора Джонсона. С целью автоматизированного мониторинга показаний ПИТП. Подключение к компьютеру (далее ПК) и машине трения осуществляется через модуль АЦП E14-440M на шину USB.

Ответственным этапом проведения эксперимента по измерению толщины смазочной пленки является градуировка измерительной системы «МТ – ПИТП – АЦП – ПК». Информации по вопросам статической и динамической градуировки подобных устройств в современной научной литературе уделено достаточно мало внимания. Поэтому авторами была разработана методика статической градуировки, основанная на применении полиэтиленовых пленок различной толщины, диэлектрическая проницаемость которых близка к диэлектрической проницаемости машинного масла [3]. Однако существенным недостатком данной методики является

STATIC CALIBRATION OF LUBRICATING FILM THICKNESS MEASURING DEVICE

Darovskoy G.V., Polyakov V.N.

The method of static calibration of the device for measuring the thickness of the lubricating film for friction machines of the Amsler type, under conditions of high specific pressures, has been developed. The testing of the device made it possible to establish the absence of the influence of various additives in the liquid lubricant on its operation, stable readings of the device with an accuracy of $\pm 5\%$ under conditions of low and high loads are provided.

Keywords: friction machine, lubricating film thickness, roller-block friction steam, capacitive method.

ограниченное ее применения только в области малых значений нагрузок для пары трения «ролик-колодка» и невозможность использования для пары трения «ролик-ролик», т.к. происходит продавливание полиэтиленовой пленки.

С целью устранения отмеченных недостатков авторами предлагается в качестве диэлектрика при статической градуировке ПИТП использовать конденсаторную бумагу марки КОН-2, диэлектрическая проницаемость которой приблизительно одинаковая с машинным маслом (2,1...2,4).

Материалы и методы

Методика градуировки трибосистемы «МТ – ПИТП – АЦП – ПК» для пары трения «ролик-колодка» включает в себя следующие этапы (рис. 1):

- установка ролика 1 и колодки 2 на машину трения, изоляция измерительной системы;
- подключение элементов измерительной цепи «МТ – ПИТП – АЦП – ПК»;
- проверка изоляции измерительной системы;
- последовательная установка образцов конденсаторной бумаги 3 различной толщины между роликом 1 и колодкой 2;
- плавное последовательное нагружение образцов модернизированной рычажной конструкцией механизма нагружения 5 (рис. 2);
- регистрация экспериментальных данных и автоматизированная их обработка на ПК.

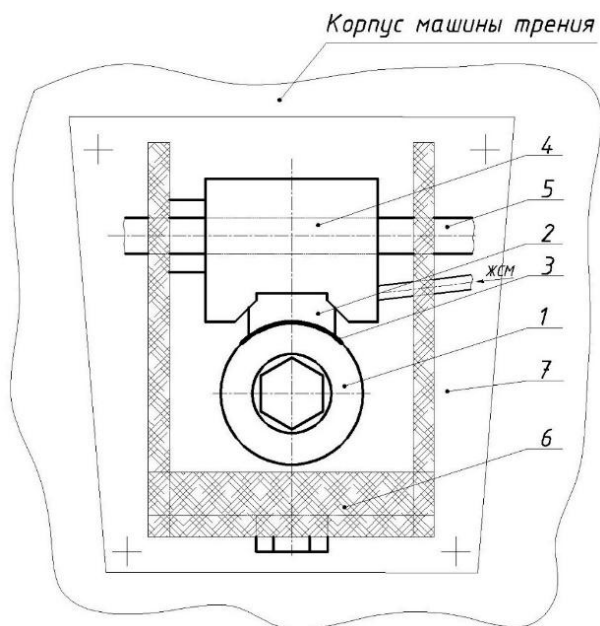


Рис. 1. Схема градуировки измерительной системы «МТ – ПИТП – АЦП – ПК»: 1 – ролик; 2 – колодка; 3 – конденсаторная бумага; 4 – держатель; 5 – рычаг механизма нагружения; 6 – смазочная камера; 7 – основание

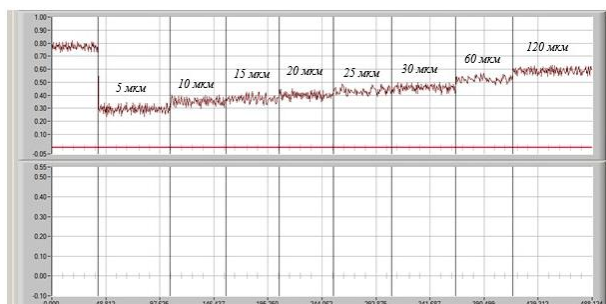


Рис. 2. Оциллограмма градуировки ПИТП при различной толщине конденсаторной бумаги h и нагрузке $F=50$ кг

При градуировке пары трения «ролик-ролик» нагрузка производится кареткой машины трения ИИ 5018 на который устанавливается ролик, а не рычагом нагружения, как в предыдущем случае.

Результаты и обсуждение

Семейство градуировочных характеристик при различных удельных нагрузках представлены на рис. 3, 4.

Ввиду различной площади контакта в парах трения «ролик-ролик» и «ролик-колодка» градуировочные характеристики имеют существенное различие. Показания ПИТП в области малых значений толщины конденсаторной бумаги $h=0...30$ мкм (см. рис. 4) при всех нагрузках значительно отличаются, в то время как при больших величинах $h=60...120$ мкм расхождение уменьшается и при значениях нормальной силы $F_1=115...1150$ Н практически совпадают.

Сличительные показания ПИТП при построении семейства градуировочных характеристик показали высокую сходимость результатов при нагрузке и разгрузке образцов, погрешность при этом не превышает $\pm 5\%$ в области малых и больших значений.

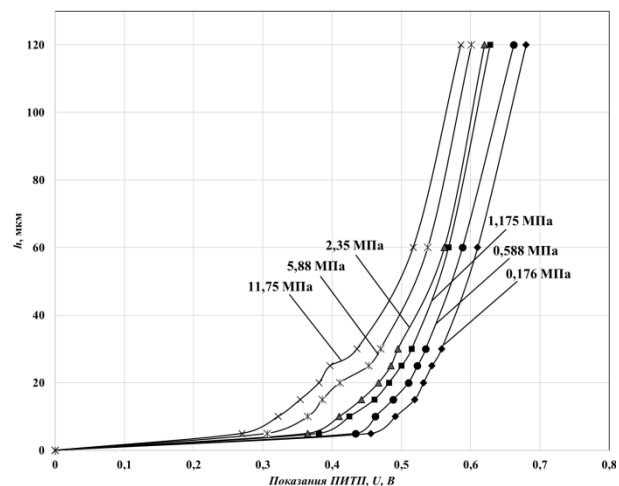


Рис. 3. Градуировочные характеристики ПИТП для пары трения «ролик-колодка»

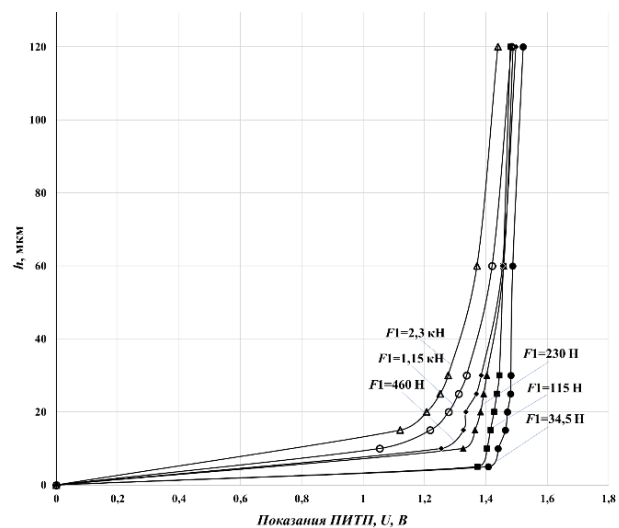


Рис. 4. Градуировочные характеристики ПИТП для пары трения «ролик-ролик»

После разгрузки трибологической системы показания ПИТП возвращались к «нулевой позиции», что свидетельствует о надежной изоляции измерительной системы.

Для апробации полученных результатов был проведен трибомониторинг пары трения «ролик-колодка» (материал ролика – сталь 45, материал колодки – БрАЖ 9-4) с добавлением чистого жидкого смазочного материала (далее ЖСМ) И-20А и с 5% добавлением меди.

Результаты эксперимента выводились на экран монитора в виде трех осциллограмм: момента, толщины смазочной пленки и температуры (рис. 5).

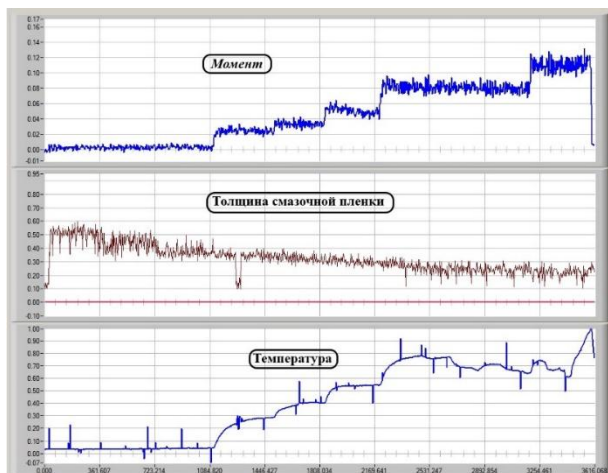


Рис. 5. Общий вид осциллограмм измерений момента, толщины смазочной пленки, температуры при испытании пары трения «ролик-колотка» (сталь-бронза БрАЖ 9-4) с подачей смазочного материала И-20А (расход 30 мл/мин); скорость вращения ролика $V=1,0$ м/с; шероховатость колотки Ra0,3

Коэффициент трения f после приработки пары трения и в условиях достижения больших нагрузок остается стабильным и имеет расхождение от 2 до 14 % в диапазоне удельного давления $p = 2,35 \dots 11,75$ МПа (рис. 6).

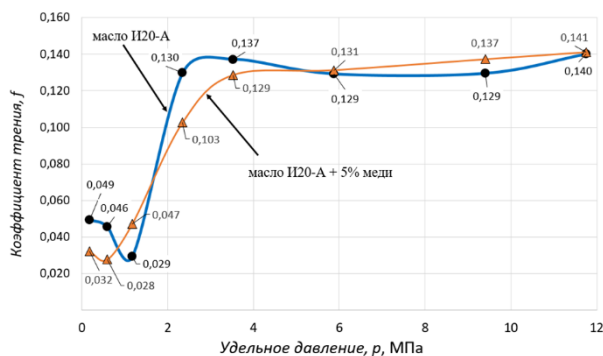


Рис. 6. Зависимость $f(p)$ в паре трения «ролик-колотка» (сталь 45-бронза БрАЖ 9-4) расход ЖСМ 30 мл/мин; $V=1,0$ м/с; шероховатость колотки Ra0,3

Температура в зоне контакта увеличивается с ростом нагрузки и достигает $t=160^\circ\text{C}$ при больших удельных давлениях $p=9,4 \dots 11,75$ МПа в паре трения с подачей И-20А+5 % меди и $t=140^\circ\text{C}$ без ее добавления. Интенсивность роста температуры в этом случае выше, чем в случае с чистым ЖСМ (рис. 7). Это объясняется большим коэффициентом трения за счет наличия частиц меди в масле в диапазоне давлений $p=3,5 \dots 9,4$ МПа.

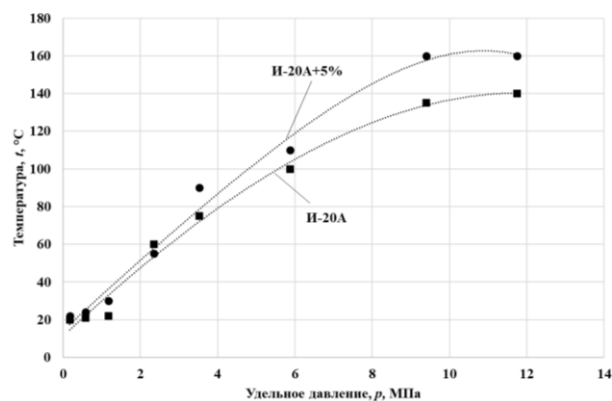


Рис. 7. Зависимость $t(p)$ в паре трения «ролик-колотка» (сталь 45-бронза БрАЖ 9-4) расход ЖСМ 30 мл/мин; $V=1,0$ м/с; шероховатость колотки Ra0,3

При малых удельных давлениях толщина смазочной пленки в паре трения с подачей И-020А+5 % меди меньше, чем с чистым ЖСМ. При этом в области давлений $p=1,75 \dots 9,4$ МПа (рис. 8) расхождение значения толщины пленки достигает не более 8% и увеличивается лишь при достижении давления 11,75 МПа, достигая $h=1,67$ мкм при температуре $t=160^\circ\text{C}$.

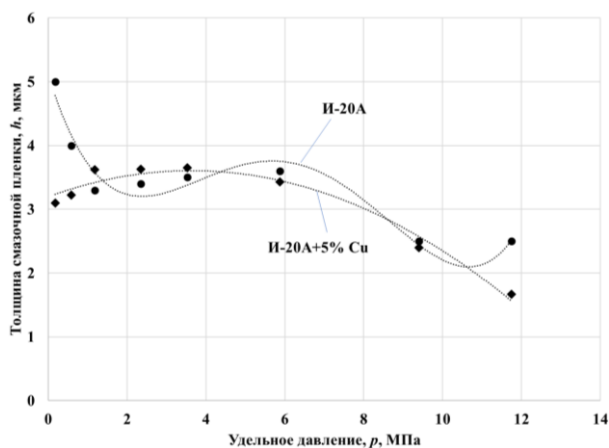


Рис. 8. Зависимость $h(p)$ в паре трения «ролик-колотка» (сталь 45-бронза БрАЖ 9-4) расход ЖСМ 30 мл/мин; $V=1,0$ м/с; шероховатость колотки Ra0,3

Заключение

1. Разработана методика статической градуировки ПИТП на модернизированной машине трения ИИ 5018, которая обеспечивает проведение трибомониторинга различных пар трения в условиях высоких удельных давлений.

2. Анализ результатов работы ПИТП показал, что сходимость показаний по результатам повторных градуировок с ранее полученными результатами не превышает $\pm 5\%$ в области малых и больших значений.

3. Апробация ПИТП показала, что измерение толщины смазочной пленки при испытании трибологических пар с добавлением ЖСМ с

различными присадками дает стабильный результат. Влияние различных частиц, содержащихся в масле, на работу прибора не обнаружено.

[1] Даровской Г.В., Кротов В.Н., Поляков В.Н., Езупова М.Н. Моделирование гидродинамического режима трения на машинах трения типа "Амслер" // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. – № 3. – С. 284-290.

[2] Даровской Г.В., Поляков В.Н., Опацких А.Н. Методика измерения толщины смазочной пленки емкостным методом на машинах трения типа «АМСЛЕР» // Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научнотехнической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 100-104.

[3] Даровской Г.В., Поляков В.Н. Разработка методики статической градуировки прибора для измерения толщины смазочной пленки // Надежность и долговечность машин и механизмов. – 2022. – С. 485-489.

ОСОБЕННОСТИ ФРЕТТИНГ-ПРОЦЕССА ВО ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ

Дубинова О.Б. *, Елагина О.Ю.

*E-mail: dubinova.o@gubkin.ru

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия.

В статье рассмотрены особенности развития процесса фреттинга во фланцевых соединениях газораспределительных станций (ГРС), работающих в условиях повышенных вибрационных воздействий. Исследовано влияние фреттинга на герметичность фланцевых соединений при использовании уплотнений различного материального исполнения. Предложена методика прогнозирования безаварийной работы фланцевого соединения на ГРС, эксплуатируемых в условиях вибраций.

Ключевые слова: газораспределительная станция (ГРС), повышенная вибрация, фреттинг, фланцевое соединения, герметичность, давление обжатия.

FEATURES OF THE FRETTING PROCESS IN FLANGE JOINTS AT GAS DISTRIBUTION STATIONS

Dubinova O.B., Elagina O.Yu.

The article considers the features of the development of the fretting process in flanged joints of gas distribution stations (GDS) operating under conditions of increased vibration effects. The effect of fretting on the tightness of flange joints when using seals of various material designs is investigated. A method is proposed for predicting the trouble-free operation of a flange joints at gas distribution stations operating under vibration conditions.

Keywords: gas distribution station (GDS), increased vibration, fretting, flange joint, tightness, compression pressure.

Введение

Фланцевые соединения – самый распространенный вид разъемных соединений, применяемый при сборке нефтегазового оборудования и различных конструкций. Большая часть таких соединений используется в системах трубопроводного транспорта газа на газораспределительных и компрессорных станциях для удобства разборки и последующей замены технологической линии, запорной-регулирующей арматуры, а также контрольно-измерительных приборов.

В последние несколько лет наблюдается повышение скоростных показателей при эксплуатации газотранспортных объектов за счет увеличения числа потребителей и, соответственно, увеличения расхода газа. Данный фактор

способствует возникновению повышенных показателей вибрации, которые негативно сказываются на герметичности фланцевых соединений и приводят к отказам вследствие их разгерметизации. В подверженных вибрационным воздействиям фланцевых соединениях происходит самопроизвольное развинчивание резьбовых соединений, а между контактирующими поверхностями фланцев и уплотнения возникает фреттинг, приводящий к изнашиванию менее прочной поверхности уплотнения. Самопроизвольное развинчивание можно предупредить либо периодической подтяжкой резьбовых соединений, либо применением специальных стопорных элементов. Проблему фреттинг-изнашивания зоны «фланец-уплотнение» решить гораздо сложнее, но не менее важно.

Цель настоящей работы - исследовать влияние фреттинга на герметичность фланцевых соединений и определить методы предотвращения их разгерметизации.

Материалы и методы

На сегодняшний день существует несколько теорий [1-13] объясняющих процесс фреттинга, однако во многих из них основным параметром является контактное давление, то есть усилие прижатия одной поверхности к другой.

Влияние усилия прижатия на износ уплотнительных материалов и металлической поверхности фланцев исследовалось посредством проведения испытаний на лабораторной установке для фреттинга, внешний вид которой и методика проведения испытаний представлены в работе [14], а образцы подготовлены в соответствии с ГОСТ 23.211-80.

Для исследования были выбраны следующие пары трения [15]:

- паронит – сталь 20;
- терморасширенный графит (ТРГ) – сталь 20;
- полиуретан – сталь 20;
- фторопласт – сталь 20;
- сталь 20 – сталь 20.

Испытания проводились при следующих условиях [15]:

- контактное давление от 0,04 МПа до 0,72 МПа;
- частота вибрации (f) – 50 Гц;
- амплитуда (A) – 500 мкм;
- скорость колебаний (v_k) – 224 мм/с.

Длительность одного цикла натуральных испытаний отдельной пары трения составляла 5,5 часов.

Износ образцов определялся весовым методом и на основании его величины рассчитывалась интенсивность изнашивания.

Для учета приведенных выше условий и последующей обработки полученных результатов, введен комплексный показатель фреттинга [15]:

$$k = \frac{P \cdot v_k^2}{2 \cdot g \cdot F} = \frac{q \cdot v_k^2}{2 \cdot g} [\text{Н/М}] \quad (1)$$

где: P – усилие прижатия, Н; v_k – скорость колебаний, мм/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; F – площадь контактной поверхности образца, мм², равная 50 мм²; q ($q_{\text{обж}}$) – контактное давление (давление обжатия), МПа.

В процессе испытаний комплексный показатель фреттинга варьировался в диапазоне 102 – 1843 Н/м, что соответствовало контактному давлению в паре трения до 20 МПа.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний представлены в виде графиков на рис. 1.

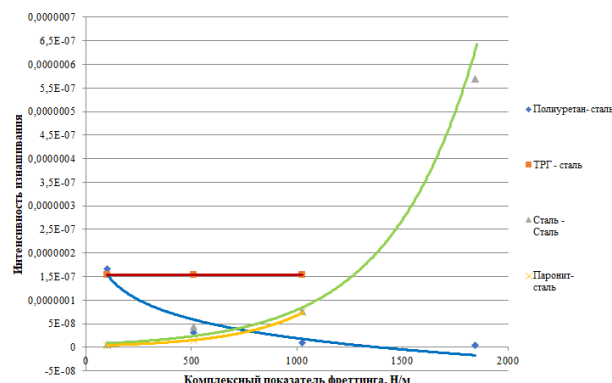


Рис. 1. Диаграмма изменения интенсивности изнашивания для разных пар трения

На основании приведенных зависимостей сделаны следующие выводы:

- у пар трения «сталь 20 – сталь 20» и «паронит–сталь 20» интенсивность изнашивания возрастает с увеличением комплексного показателя фреттинга;
- у пары трения «полиуретан – сталь 20» интенсивность изнашивания снижается с увеличением комплексного показателя;
- у пары трения «ТРГ – сталь 20» - величина интенсивности изнашивания не зависит от значения комплексного показателя, оставаясь постоянной.

Исходя из данных графиков получены уравнения для определения интенсивности изнашивания, представленные в табл. 1.

Табл. 1. Уравнения для определения интенсивности изнашивания

ТРГ-сталь 20	$I_{\text{ме-упл}} = 2 \cdot 10^{-7}$
Паронит-сталь 20	$I_{\text{ме-упл}} = 3 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,003k}$
Полиуретан-сталь 20	$I_{\text{ме-упл}} = -6 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(k) + 4 \cdot 10^{-7}$
Сталь 20 – сталь 20	$I_{\text{ме-упл}} = 7 \cdot 10^{-9} \cdot \exp^{0,0025k}$

Также по результатам испытаний проведен расчет величины износа в зависимости от скорости вибрации и интенсивности изнашивания в соответствии с уравнением (2) и сделаны выводы по влиянию фреттинга в диапазоне вибрационных нагрузок от 1 мм/с до 18 мм/с на герметичность фланцевых соединений при использовании разных уплотнительных материалов.

$$I_{\phi} = 19008 \times I_{\text{ме-упл}} \times v_{\text{скз}} \times T \quad (2)$$

где $I_{\text{ме-упл}}$ – интенсивность изнашивания пар трения, имитирующая контакт фланца с уплотнением (табл. 1); $v_{\text{скз}}$ – виброскорость, мм/с;

T – время испытаний, соответствующее продолжительности эксплуатации при повышенных скоростях транспортировки газа, сутки.

В условиях высокого уровня вибраций изнашивание поверхности уплотнения в результате фреттинга меньше всего происходит во фланцевых соединениях с прокладками из паронита и углеродистой стали, но паронитовые уплотнения имеют свойство небольшого сжатия, а значит их изнашивание не сразу вызовет потерю герметичности.

Смятие уплотнения из паронита во фланцевом соединении характеризуется коэффициентом обжатия и давлением обжатия, которые с развитием фреттинга, появлением и последующим накоплением износа изменяются: коэффициент обжатия – в сторону увеличения, а давления обжатия в сторону уменьшения. На рис. 2 представлен график снижения давления обжатия при значениях виброскорости от 1 мм/с до 18 мм/с за 12 месяцев эксплуатации.

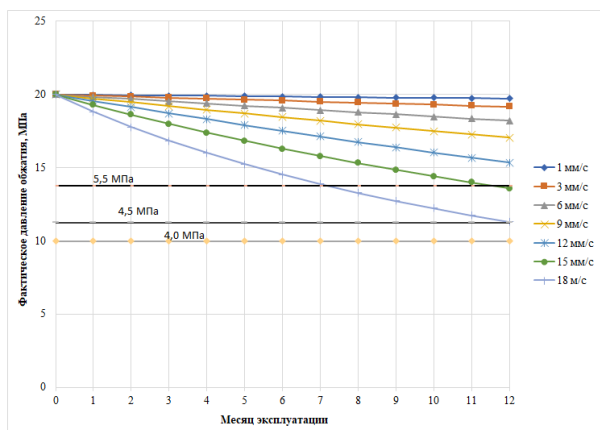


Рис. 2. Графики снижения давления обжатия в зависимости от виброскорости и времени эксплуатации

При скоростях вибрации от 1 мм/с до 6 мм/с наблюдается слабое влияние фреттинга на работоспособность фланцевого соединения, при котором давление обжатия остается долгое время на одном уровне, снижаясь незначительно. Интенсивнее давления обжатие снижается при скоростях вибрации более 9 мм/с и соответственно уменьшает время безаварийной работы фланцевого соединения, но при этом, чем ниже будет рабочее давление в трубопроводе, тем дольше будет сохраняться условия герметичности.

Исходя из полученных результатов были составлены уравнения для определения продолжительности периода безаварийной эксплуатации фланцевого соединения.

Заключение

1. Установлено, что контактное давление, определяемое усилием прижатия двух контактирующих поверхностей – один из основных параметров, который влияет на величину износа в зоне контакта.

2. По результатам испытаний определены особенности развития фреттинга и его влияние на герметичность фланцевого соединения при использовании разных материалов для уплотнения.

3. Определено, что паронит за счет своих механических свойств и климатической стойкости способен дольше обеспечивать герметичность соединения.

4. Установлено, что вследствие развития фреттинга происходит уменьшение толщины прокладки и снижение давления обжатия, что приводит к разгерметизации соединения.

5. Получены уравнения, которые позволяют рассчитывать продолжительность безаварийной эксплуатации фланцевого соединения.

- [1] Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. – Киев: Техника, 1974. – 272 с.
- [2] Островский М.С. Фреттинг как причина снижения надёжности горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 3. – С. 315-331.
- [3] Петухов А.Н. Фреттинг и фреттинг усталость в малоподвижных соединениях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королёва. – 2006. – № 1-2. – С. 115-120.
- [4] Артемов И.И., Кривчик В.Д., Меньшова С.Б., Келасев В.В. Модель развития фреттинг-коррозии в поверхностном слое листа рессоры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 213-224.
- [5] Ковалевский В.В. Адгезионная модель износа при малоамплитудном фреттинг-процессе // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. – № 4. – С. 647-653.
- [6] Шалапко Ю.И., Тарасова Т.В. Процессы динамики поверхностных слоев при малоамплитудном фреттинге // Трение и износ. – 2013. – Т. 34. – № 3. – С. 227-236.
- [7] Tomlinson G. A., Thorpe P. L., Gough H. J. An investigation of the fretting corrosion of closely fitting surfaces // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1939. – Т. 141. – №. 1. – С. 223-249.
- [8] Vincent L. Mechanisms and materials in fretting // Wear. – 1992. – Т. 153. – С. 135-138.
- [9] Bohórquez L. et al. On the prediction of the crack initiation path in fretting fatigue // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2019. – Т. 99. – С. 140-146.
- [10] Liu X. et al. The effect of wear on short crack propagation under fretting conditions // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Т. 157. – С. 552-560.
- [11] do Rêgo E. M. F., Antunes M. A., de Oliveira Miranda A. C. A methodology for fretting fatigue life estimation using strain-based fracture mechanics // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Т. 194. – С. 24-41.
- [12] Ognjanovic M., Milos M., Kolarevic N. Testing and prediction of structural failures caused by fretting // Materials Today: Proceedings. – 2016. – Т. 3. – №. 4. – С. 1103-1107.

[13] Kubota M. et al. A quantitative approach to evaluate fretting fatigue limit using a pre-cracked specimen //Tribology International. – 2017. – Т. 108. – С. 48-56.

[14] Елагина О.Ю., Буклаков А.Г., Дубинова О.Б., Новотни-Фаркас Ф. Развитие фреттинга при эксплуатации газотранспортных объектов //Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 5. – С. 562-571.

[15] Дубинова О.Б., Елагина О.Ю., Дубинов Ю.С. Исследование влияния фреттинга на опасность разгерметизации фланцевых соединений на объектах ГРС в условиях повышенных вибраций //Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2022. – № 2 (307). – С. 158-171.

ПОЛУЧЕНИЕ И ВЛИЯНИЕ ФЕРРИТА НИКЕЛЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОК

Задошенко Е.Г.

E-mail: zadoshenkoq@rambler.ru

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия.

Целью данной работы является получение наночастиц феррита никеля и оценка их влияния на триботехнические характеристики смазки Литол-24, вазелинового масла и олеиновой кислоты. Методом химического осаждения был синтезирован порошок. На основе метода РФА установили, что полученные частицы соответствуют составу $NiFe_2O_4$ и нанокристаллиты имеют размер 18 нм. Результаты исследований феррита никеля с помощью АСМ показали их морфологию и полидисперсный характер. Установлено, что триботехнические свойства Литол-24, вазелинового масла и олеиновой кислоты с содержанием 0,05; 0,1; 0,15% масс. наночастиц феррита никеля улучшаются.

Ключевые слова: трение, износ, наночастицы, феррит никеля, смазка, противоизносные свойства.

Введение

В настоящее время повышать функциональные возможности машин и механизмов, обеспечивать необходимые характеристики трения, защищать поверхности и узлы трения от преждевременного износа позволяет использование смазочных материалов. Введением в состав смазок добавок в виде органических и неорганических материалов достигается улучшение их смазочного действия и расширение диапазона их функционирования [1]. Известно большое число смазочных масел, в состав которых введены порошки (присадки) магнитных наноматериалов, в том числе нанодисперсные частицы ферритов [2-5]. Ферриты – это широкий спектр минералов и синтетических материалов,

OBTAINING AND EFFECT OF NICKEL FERRITE ON THE TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS

Zadoshenko E.G.

The purpose of this work is to obtain nickel ferrite nanoparticles and evaluate their effect on the tribotechnical indications of the Litol-24 lubricant, liquid paraffin, and oleic acid. A powder was synthesized by chemical precipitation. Based on the XPA method, it was found that the obtained particles correspond to the composition of $NiFe_2O_4$ and the nanocrystalites have a size of 18 nm. The results of studies of nickel ferrite using AFM showed their morphology and polydisperse character. It has been established that the tribological properties of Litol-24, liquid paraffin and oleic acid with a content of 0,05; 0,1; 0,15% wt. nickel ferrite nanoparticles are improving.

Keywords: friction, wear, magnetite nanoparticles, nickel ferrite, lubrication, antiwear properties.

которые используются в различных областях науки и техники, в оптике, радиоэлектронике, механике и других отраслях промышленности. Они представляют собой соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов, являющихся ферромагнетиками: никель, кобальт, цинк медь и другие. Так ферриты никеля отличаются большой химической и термической стабильностью, а также значительной электропроводностью, хорошими механическими свойствами и достаточно невысокой стоимостью. Ферриты никеля очень чувствительны к методам синтеза, так как их свойства полностью зависят от фазового состава и микроструктуры, размера кристаллитов и пор, величины удельной поверхности, а также параметров решетки и

характера распределения ионов в ней. Из-за этих свойств, главным преимуществом ферритов является возможность регулировать их структуру, природу активных центров на поверхности, изменяя катионный состав [6].

Главным критерием при разработке смазочных сред с добавками нанодисперсных частиц ферритов является образование в зоне контакта разделительного слоя, препятствующего взаимодействию деталей узла трения и уменьшению пятен износа трущихся поверхностей. В формировании данного слоя участвуют частицы металлов или металлосодержащие соединения, деформированные под действием контактных давлений и сдвиговых напряжений [7]. Такие частицы способны изменять микрорельеф контактной зоны, заполняя микронеровности поверхностей трения и уменьшая тем самым величину контактного давления. Требуемых параметров частиц магнитного материала можно достичь за счет регулирования его состава и параметров кристаллической решетки, а также контроля размеров и форм кристаллитов [4].

Целью данной работы является синтез наноразмерного порошка феррита никеля, и оценка его влияния на трибологические свойства смазочных материалов: ЛИТОЛ-24, вазелиновое масло и олеиновая кислота.

Экспериментальная часть

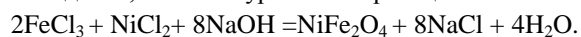
Ферриты никеля получали химическим осаждением, используя смеси солей хлорида никеля, сульфата железа (II) и хлорида железа (III) и избыток водного раствора гидроксида натрия. В результате протекания реакции обмена образовался осадок темно-коричневого цвета, который нагревали на водяной бане при постоянной температуре 90 °C в течение двух часов до перехода осадка в черный цвет. Созревшие магнитные осадки после охлаждения отфильтровывали, многократно промывали дистиллированной водой с переменной магнитной декантацией, стабилизировали изопропиловым спиртом и высушивали при температуре 100 °C.

Фазовый состав полученных частиц изучали рентгенофазовый анализом (РФА) на автоматизированном приборе ARL X'TRA на излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda_{\text{Fe}}=1.54056 \text{ \AA}$) в интервале 2θ от 5 до 80 °C при скорости сканирования 5 °/мин и температуре 25 °C. Для обработки рентгенограммы использовали гранулометрический анализ в программе Nanopowder XRD. Визуализацию поверхности, размера и формы синтезируемых частиц осуществляли с применением атомно-

силовой микроскопии (АСМ) на приборе марки РНУВЕ Compact.

Смазочные композиции с содержанием 0,05; 0,1; 0,15 % массы наночастиц феррита никеля приготавливали на основе базовых смазок ЛИТОЛ-24 (ГОСТ 21150-2017), вазелиновое масло (ГОСТ 314-78) и олеиновая кислота (ГОСТ 7580-91). Оценку их противоизносных свойств проводили на ЧШМ на стальных шариках диаметром 10 мм из стали ШХ-15, с частотой вращения $1460 \pm 70 \text{ мин}^{-1}$, нагрузкой – 196 Н (20 кгс), временем испытаний – 60 минут. Диаметр пятна износа $D_{\text{и}}$ определяли с помощью оптического микроскопа по окончании испытаний. Для уменьшения разброса данных проводили по три эксперимента с разными концентрациями феррита никеля для каждого образца смазочного материала.

Обсуждение и результаты. Синтез феррита никеля был выполнен методом химического осаждения, согласно уравнению реакции:



Процесс синтеза проводился при соблюдении соотношения между ионами железа и никеля $\text{Fe}^{3+}:(\text{Fe}^{2+}+\text{Ni}^{2+})=2:1$. В ходе синтеза ионы двухвалентного железа Fe^{2+} частично или полностью замещаются на ионы Ni^{2+} и формируются соединения шпинельной структуры. Формирование шпинельной структуры не происходит так, быстро как при наличии только ионов Fe^{2+} , а включается в предшествующие процессы растворения и рекристаллизации аморфного осадка, содержащего гидроксиды двухвалентных катионов никеля, а также оксигидроксид Fe^{3+} . Сокристаллизация оксидов разных металлов из водных растворов обеспечивалась дополнительным прогреванием реакционной массы на водяной бане при температуре 90 °C в течение двух часов при интенсивном перемешивании.

Анализ рентгенограммы полученного порошка подтвердил соответствие частиц веществу тревориту (NiFe_2O_4). Рентгенограмма исследуемого образца, показывает наличие острых кристаллических пиков, наблюдающихся при угле $2\theta = 17,94; 30,160; 35,580; 43,66, 47,6$ и $63,04$, которые соответствуют пикам частиц феррита никеля с кубической природой (рис. 1).

Обработка результатов рентгенограммы в программе Nanopowder XRD показала, что средний размер наночастиц составляет 18 нм.

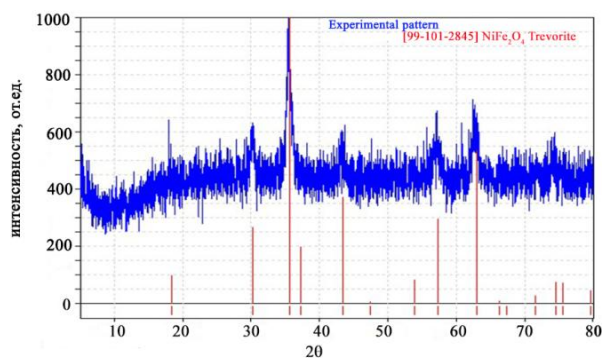


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа

На основе данных АСМ можно сделать вывод, что синтезированные частицы феррита никеля имеют полидисперсный характер, а максимальный размер частиц составляет 48 нм (рис. 2). Расхождение с данными АСМ и рентгенофазового анализа позволяет предположить, что частица феррита никеля представляет собой агломерат и состоит из нескольких кристаллитов, что означает намного большие размеры частиц, чем размеры кристаллитов.

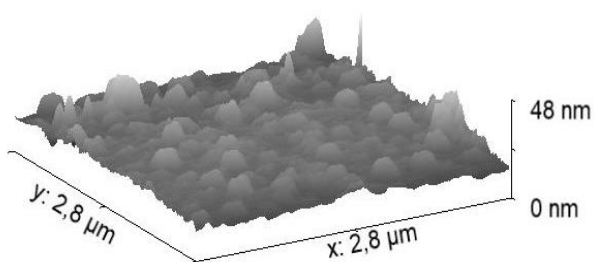


Рис. 2. АСМ изображение частиц феррита никеля

По результатам серии экспериментов на четырехшариковой машине трения видно, что добавки полученного порошка в такие смазочные среды, как ЛИТОЛ-24 и олеиновая кислота, уменьшают диаметр пятен износа (рис. 3).

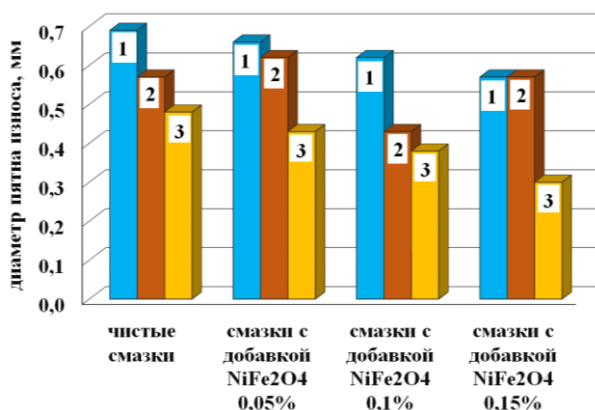


Рис. 3. Диаметр пятен износа в смазках при нагрузке 196 Н:
1 – смазка ЛИТОЛ-24; 2 – вазелиновое масло;
3 – олеиновая кислота

Как видно из трибологических испытаний, смазочные композиции, где базовый основой выступает вазелиновое масло, ведут себя нестабильно. Данное явление можно объяснить тем, что вазелиновое масло относится к парафинам, частицы в его составе неравномерно распределяются при низких и высоких концентрациях феррита никеля, что приводит к формированию абразивных частиц, и, как следствие, большому износу.

По сравнению с другими смазками олеиновая кислота демонстрирует наилучшие противоизносные показатели как в чистом виде, так и в присутствии ферритов никеля, поскольку относится к ПАВ и адсорбируется в зоне трения в виде молекулярных структур.

Улучшение противоизносных свойств исследуемых смазочных композиций может быть связано с заполнением борозд и впадин на поверхности трения наночастицами феррита никеля из смазочной среды, что приводит к увеличению площади контакта поверхности трения и уменьшению контактного давления. В этом случае контакт осуществляется не между стальными поверхностями трущихся деталей, а мельчайшими частицами на поверхности. Благодаря большой удельной поверхности, повышенной поверхностной энергии и способности легко адсорбироваться на поверхности износа, ферриты никеля образуют граничную смазочную пленку, что с ростом концентрации в смазочном материале активно влияет на уменьшение износа поверхности при трении [7].

Также уменьшение диаметров пятен износа может быть связано с образованием разделительных структурированных слоев, обладающих устойчивостью к разрушению под действием нагрузок, температур и сдвиговых напряжений, что в конечном итоге приводит к повышению износостойкости узлов трения. Улучшение, производимое наночастицами, обусловлено их высоким сродством к металлическим поверхностям, поэтому они прилипают к ним, предотвращая контакт металла с металлом.

Выводы

Химическим осаждением получены наночастицы феррита никеля. Синтезированные частицы имеют полидисперсный характер и представляют собой агломераты с максимальным размером 48 нм. Установлено, что введение наночастиц феррита никеля приводит к улучшению триботехнических показателей. Повышение противоизносных свойств связано с процессами упрочнения приповерхностных слоев трущихся

поверхностей или с формированием в зоне трения поверхностных структур способных минимизировать износ.

[1] Thampi A.D. et al. The effect of nanoparticle additives on the tribological properties of various lubricating oils—Review //Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 47. – P. 4919-4924.

[2] Javadian S. et al. Magnetic superhydrophobic polyurethane sponge loaded with Fe₃O₄@ oleic acid@ graphene oxide as high performance adsorbent oil from water //Chemical Engineering Journal. – 2021. – T. 408. – С. 127369.

[3] Singh A.K. et al. Effect of surface treatment on tribological characteristic of ferrite nanoparticles epoxy composites //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – T. 802. – №. 1. – С. 012007.

[4] Chouhan M. et al. An investigation on the optimization of anti-wear performance of nano-Fe₃O₄ based ferro-magnetic lubricant //Jurnal Tribologi. – 2020. – T. 25. – С. 119-135.

[5] Задошенко Е.Г. Влияние наночастиц Fe₃O₄ на вязкостные и триботехнические характеристики олеиновой кислоты // Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 108-112.

[6] Kulkarni G.D. et al. Green synthesis and investigations of structural, cation distribution, morphological, and magnetic properties of nanoscale nickel ferrites: the effect of green fuel proportion //Phase Transitions. – 2021. – T. 94. – №. 12. – С. 994-1005.

[7] José M. Liñeira del Río, et al. Tribological Behavior of Nanolubricants Based on Coated Magnetic Nanoparticles and Trimethylolpropane Trioleate Base Oil // Nanomaterials. – 2020. – T.10. – С.683-705.

АДГЕЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ НЕРОВНОСТЕЙ

Измеров М.А.* , Тихомиров В.П.

*E-mail: m.izmerov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия.

Проведён анализ адгезионного изнашивания инженерных поверхностей при малых нагрузках для условия упругого деформирования микро-неровностей. Установлена зависимость коэффициента изнашивания от топографических параметров и упруго-пластических свойств. Метод позволяет подобрать микрогеометрию поверхностей для обеспечения минимального износа.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, упругий контакт, износ при малых нагрузках.

Введение

При малых нагрузках несущая способность поверхности определяется структурными особенностями фрактального шероховатого слоя. При этом субмикронеровности деформируются пластически, и износ происходит в условиях пластической деформации до тех пор, пока при заданной нагрузке с увеличением площади микроконтактов они не приобретут упругое состояние. Тогда процесс изнашивания будет происходить в условиях преимущественно упругого контакта. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что в этом случае интенсивность изнашивания и, следовательно, коэффициент износа имеют постоянное значение, что характеризует период нормального

ADHESIVE WEAR WITH ELASTIC DEFORMATION OF IRREGULARITIES

Izmerov M.A., Tikhomirov V.P.

The analysis of adhesive wear of engineering surfaces under low loads for the conditions of elastic deformation of micro-irregularities is carried out. The dependence of the wear coefficient on topographic parameters and elastic-plastic properties is established. The method allows you to select the microgeometry of surfaces to ensure minimal wear.

Keywords: contact interaction, elastic contact, wear at low loads.

изнашивания. Анализ изношенных поверхностей позволяет определить, что ведущим видом изнашивания является адгезионный износ: отсутствуют следы пропахивания, характерные для абразивного износа и вырывы из-за схватывания, указывающие на когезионный износ.

Оценка изнашивания

Опорная площадь изношенной поверхности и площадь среза неровностей одной и той же поверхности на одинаковом уровне не совпадают (рис. 1, [1]). В разработанной модели, основанной на 3D моделировании контакта шероховатых поверхностей фрактальными моделями, это различие не учитывается, являясь допущением, полагая, что величина линейного износа сохраняется.

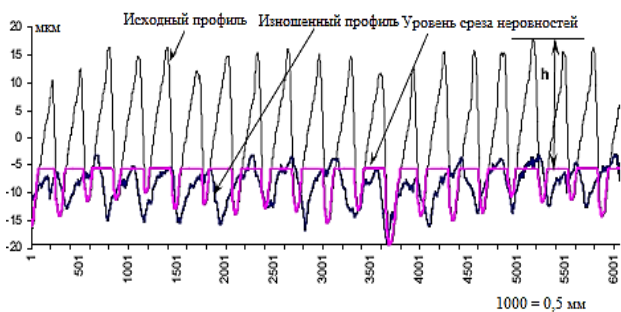


Рис. 1. Износ поверхности (профильная оценка)

Фактическая площадь упругого контакта шероховатой (фрактальной) поверхности равна

$$A_{re} = \frac{D_p}{2 - D_p} a_L \left[1 - \left(\frac{a_c}{a_L} \right)^{(2-D_p)/2} \right].$$

Здесь a_L – площадь максимального пятна контакта, D_p – фрактальная размерность профиля ($1 < D_p < 2$), a_c – критическая площадь пятна контакта, соответствующая переходу от пластического состояния к упругому.

Критическая площадь контакта равна

$$a_c = \left[\frac{\pi^3}{2.4(H/E^*)^2} \right]^{1/D_p-1} G^2.$$

Здесь H – твёрдость, E^* – приведенный модуль упругости, G – фрактальный параметр поверхности.

Объем отдельной деформированной неровности V_e с площадью упругого пятна контакта a и радиусом закругления верхней части выступа R выразим соотношением

$$dV_e = \frac{a^2}{2\pi R} + \frac{\pi a^3}{6(\pi R)^3}.$$

Для множественного контакта объем изношенного материала определим как

$$V_e = \int_{a_c}^{a_L} dV_e(a') n(a') da' = \frac{D_p}{2\pi R(4 - D_p)} \cdot \left(a_L^2 - a_L^{D_p/2} a_c^{(4-D_p)/2} \right) + \frac{D_p}{6\pi^2 R^3(6 - D_p)} \cdot \left(a_L^3 - a_L^{D_p/2} a_c^{(6-D_p)/2} \right).$$

Число циклов нагружения, приводящих к отделению материала от поверхности и образованию частиц износа, оценим следующей зависимостью [2]

$$n_e = \left(\frac{\sigma_B}{k' f_{min} p_r} \right)^{t_e}.$$

Здесь σ_B – временное сопротивление разрыву; k' – коэффициент, принимаемый для высокоэластичных материалов 3 и для хрупких – 5; f_{min} – коэффициент трения, соответствующий принимаемому контактному давлению; p_r – фактическое давление, равное

$p_r = F_N/A_r$; t_e – показатель степени в уравнении Веллера (для сталей $t_e = 10 \dots 14$). Например, для образца из стали 45 (закалка 850° , охлаждение в воде, отпуск при 500°) с параметрами $\sigma_B = 850$ МПа, фактическое давление 280 МПа, расчётное число циклов нагружения будет

$$n_e = \left(\frac{830}{5 \cdot 0,2 \cdot 280} \right)^{12} = 0,46 \cdot 10^6.$$

Приняв во внимание результаты исследований, полученных в рамках усталостной гипотезы изнашивания, предложенной И.В. Крагельским и Н.М. Михиным [3], запишем выражение для линейной интенсивности изнашивания (или коэффициента изнашивания) в виде

$$i_h = k_{we} = \frac{\sqrt{\pi/a_L} V_e}{2A_{re} n_e}$$

На рис. 2 представлен график зависимости коэффициента износа от площади максимального пятна контакта, находящегося в упругом состоянии и выраженного в виде $n \cdot a_c$, $n = 5; 6; 7; \dots; 15$.

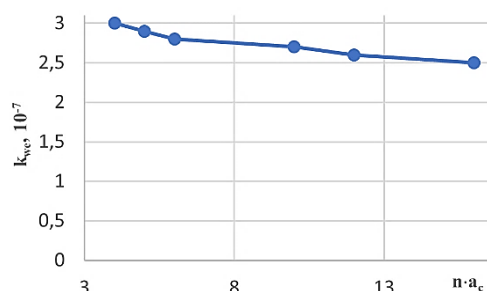


Рис. 2. Зависимость коэффициента износа от пятен контакта

Результаты расчета показывают, что коэффициент износа имеет практически постоянное значение при рассматриваемом изменении площади пятен контакта. Это означает, что в процессе нормального изнашивания коэффициент износа постоянен, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Ранее нами было получено выражение для оценки коэффициента изнашивания для пластического контакта в конечном виде

$$k_{wp} = i_h = \frac{V_{dp}}{A_r n_p d_n}.$$

Здесь V_{dp} – объем изношенного материала при пластическом контакте (в этой работе не приводится), A_r – фактическая площадь контакта при заданной нагрузке, n_p – число циклов нагружения, d_n – диаметр пятна контакта.

Геометрические параметры уравнений, такие, как A_r , d_n и прочие находят [3], анализируя контактное взаимодействие поверхностей.

Таким образом, первичный контакт слабонагруженных узлов трения происходит на

участках микровыступов, обусловленных субмикрощероховатостью, которые находятся в пластическом состоянии и приводят к появлению участка приработки. При их постепенном изнашивании размер фактических пятен контакта увеличивается, приводя контакт к упругому состоянию, когда коэффициент изнашивания практически стабилизируется (рис. 2) и возникает период нормального режима работы (рис. 3).

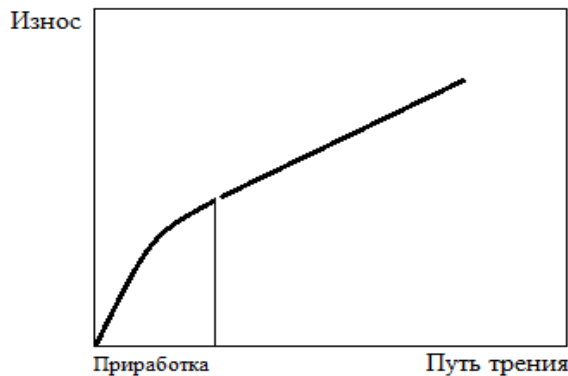


Рис. 3. Кривая износа

Коэффициент износа пропорционален тангенсу угла к кривой изнашивания в период приработки. Как видно из рис. 3, наклон касательной к кривой износа в период приработки с ростом пути трения уменьшается, что свидетельствует об уменьшении коэффициента износа. Это обстоятельство подтверждается расчетами.

В случае упругопластического контакта объем изношенного материала в зависимости от пути трения L можно определить по соотношению

$$V = (k_{wp}A_{rp} + k_{we}A_{rt})L = \frac{D_p}{2 - D_p} \left[k_{wp} a_L^{D_p/2} a_c^{(2-D_p)/2} + k_{we} (a_L - a_L^{D_p/2} a_c^{(2-D_p)/2}) \right] L.$$

С учётом того, что

$$a_L = \frac{2 - D_p}{D_p} A_r,$$

То можно записать

$$V = A_r \left[k_{we} - (k_{we} - k_{wp}) a_L^{\frac{D_p-2}{2}} a_c^{\frac{(2-D_p)}{2}} \right] L = A_r \left[k_{we} - (k_{we} - k_{wp}) \cdot \left(\frac{2 - D_p}{D_p} A_r \right)^{\frac{D_p-2}{2}} \cdot \left(\left[\frac{\pi^3}{2,4(H/E^*)^2} \right]^{\frac{1}{D_p-1}} G^2 \right)^{\frac{2-D_p}{2}} \right] L.$$

Введем безразмерные факторы:

$$V^* = \frac{V}{A_a L}; A_r^* = \frac{A_r}{A_a}; G^* = \frac{G}{\sqrt{A_a}}; \psi = \frac{H}{E^*}.$$

С учетом безразмерных факторов запишем

$$V^* = A_r^* \left[k_{we} - (k_{we} - k_{wp}) \cdot \left(\frac{D_p}{(2 - D_p) A_r^*} \frac{\pi^{3(D_p-1)}}{2,4^{D_p-1}} \frac{G^{*2}}{\psi^{2(D_p-1)}} \right)^{\frac{2-D_p}{2}} \right]$$

Анализ зависимости относительного объема изношенного материала от фрактальной размерности для условно постоянных факторов $\psi = 0,01$; $G^* = 10^{-7}$; $k_{we} = 10^{-6}$; $k_{wp} = 10^{-4}$, представлен на рис. 4.

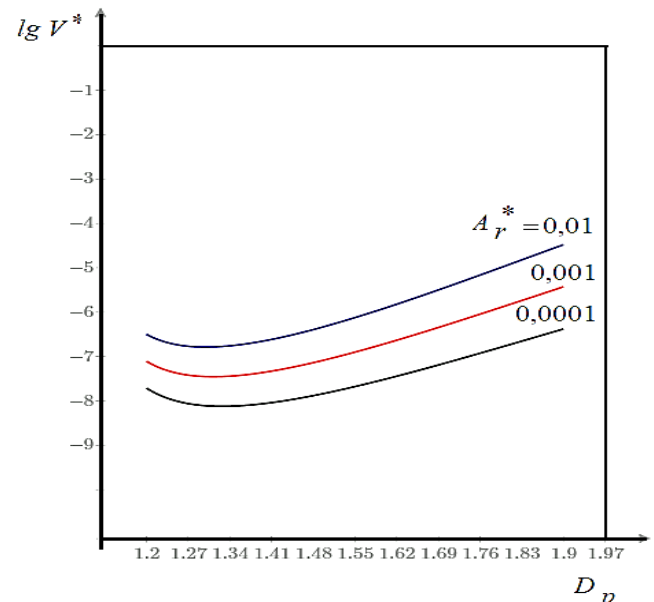


Рис. 4. Зависимость относительного объема изношенного материала от фрактальной размерности

В соответствии с рис. 4 объем изношенного материала зависит от фрактальной размерности, и при этом с увеличением фрактальной размерности величина износа проходит через минимум. С уменьшением относительной фактической площади значение минимума снижается. Нами не рассматривается переход от адгезионного изнашивания к когезионному, связанному со схватыванием, и не проводился анализ критериев подобного перехода, известных в литературе.

Уменьшение на порядок относительной площади контакта приводит примерно к такому же снижению износа. Минимум относительного износа для данных условий соответствует фрактальной размерности примерно равной $D_p = 1,3$.

Выводы

1. При малых нагрузках вначале реализуется пластический режим деформации неровностей нано-

шероховатого слоя, который по мере изнашивания переходит в упругое состояние.

2. Коэффициент изнашивания уменьшается на этапе приработки, приближаясь к устойчивому значению при нормальном изнашивании, показывая слабую зависимость от нормальной нагрузки.

3. Получена зависимость относительного объема изношенного материала от фрактальной размерности. Показано, что для принятых коэффициентов износа относительный объем изношенного материала зависит от относительной

площади контакта, физико-механических свойств и фрактальной размерности, при этом наблюдается минимум износа при $D_p \square 1,3$.

[1] Rîpă M., Pliuță V. Studies of worn surfaces by relocation profilometry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 295. – №. 1. – С. 012032.

[2] Крагельский И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин // Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

[3] Komvopoulos K. Effects of multi-scale roughness and frictional heating on solid body contact deformation // Comptes Rendus Mécanique. – 2008. – Т. 336. – №. 1-2. – С. 149-162.

НОВЫЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

¹Казakov А.М.*, ¹Шолом В.Ю., ¹Крамер О.Л., ¹Корнилова, А.П.,
²Пшеничная М.А., ³Поплавский И.В.

*E-mail: rosoil@rosoil.ru

¹ООО «Хозрасчетный творческий центр уфимского авиационного института», Уфа, Россия;

²Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия;

³25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии
Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия.

На основании результатов сравнительных лабораторных испытаний показано, что новые российские универсальные смазочные материалы Росойл превосходят импортные аналоги по трибологическим характеристикам, защитной способности и чистящим свойствам.

Ключевые слова: универсальные смазочные материалы, лабораторные испытания, трибологические характеристики, защита от коррозии, чистящие свойства, импортозамещение.

Введение

Смазочный материал (СМ) является важнейшим конструкционным элементом узла трения. В результате действия СМ уменьшаются потери энергии на трение, снижается износ и предотвращается заедание подвижных сопряжений деталей машин и механизмов, повышается их надежность и долговечность [1].

Консервационные и рабоче-консервационные СМ позволяют защитить металлоизделия от коррозии и коррозионно-механического изнашивания во время хранения и эксплуатации [2,3].

Уход с российского рынка крупных иностранных производителей привел к образованию дефицита некоторых видов СМ, предназначенных

NEW UNIVERSAL LUBRICANTS

Kazakov A.M., Sholom V.Yu., Kramer O.L., Kornilova A.P., Pshenichnaya M.A., Poplavsky I.V.

Based on the results of comparative laboratory tests it is shown, that the new Russian universal lubricants Rosoil are superior to their imported counterparts in tribological characteristics, protective capacity and cleaning properties.

Keywords: universal lubricants, laboratory tests, tribological characteristics, corrosion protection, cleaning properties, import substitution.

для смазывания узлов и механизмов, защиты металлоизделий от коррозии, механической обработки металлов и др. Проблема заключается не только в отсутствии СМ иностранного производства, но и в том, что многие российские материалы производились с использованием импортных присадок. Поэтому разработка и выпуск новых российских СМ из отечественных компонентов, обладающих высокими трибологическими характеристиками и защитной способностью является актуальной задачей.

Большим спросом у организаций и населения пользуются импортные универсальные смазочные материалы (УСМ) для многоцелевого применения в том числе для ухода за стрелковым оружием:

«WD-40» (WD-40 Company, USA), «Ballistol Universal» и «Ballistol Gunex» (BALLISTOL GmbH, Germany), «Barricade» (Birchwood Casey, USA) и др.

Для замены импортной продукции ООО «ХТЦ УАИ» разрабатывает линейку отечественных материалов из российских компонентов. На сегодняшний день уже созданы три продукта: универсальная проникающая и водовытесняющая смазка «Росойл-Вэдэшка», универсальное консервационное ружейное масло «Росойл-РЖ» и универсальный проникающий состав «Росойл-ВД», освоено их промышленное производство в том числе в аэрозольной упаковке. Планируется выпуск аэрозолей СМ специального назначения.

В данной работе представлены результаты сравнительных испытаний трибологических характеристик, защитной способности и чистящих свойств новых российских УСМ Росойл и импортных аналогов.

Материалы и методы

Сравнительные лабораторные испытания УСМ проводились в лаборатории испытаний технологических смазочных материалов ХТЦ УАИ.

Определение трибологических характеристик проводили на четырехшариковой машине ЧМТ-1 по ГОСТ 9490-75.

Ускоренные испытания защитной способности УСМ проводили в камере соляного тумана КСТ-2 по ISO 9227:2017. Для испытаний применяли пластинки из стали марки 08 пс размером (100×100) мм, толщиной 1,2 мм. УСМ наносили на пластинки распылением из аэрозольных баллонов при температуре (20-25) °С. Перед испытанием пластинки с УСМ выдерживали на стойках из органического стекла под углом 20° к вертикали на воздухе в течение 1 ч. Водность нейтрального соляного тумана за время испытаний – 1,5 мл/ч. Антикоррозионные свойства УСМ оценивали по площади коррозионного поражения пластинок после 7 ч испытания. Чем меньше площадь коррозионного поражения металлической пластины – тем выше защитная способность УСМ.

Чистящие свойства УСМ предназначенных в том числе для чистки стрелкового оружия оценивали по исследовательской методике, сущность которой заключается в определении массы удаленного порохового нагара с внутренней поверхности металлической чашки войлочным пыжом, предварительно смоченным в исследуемом образце УСМ. Пороховой нагар получали сжиганием 0,5 г пороха в чашке из нержавеющей стали марки Х18Н10Т диаметром 27 мм и высотой 7 мм. Нагар удаляли при помощи тонкошёрстных

чистошерстяных войлочных пыжей, установленных на вращающемся со скоростью 500 об/мин штоке в течение 60 секунд при нагрузке 0,6 кгс. Затем чашки промывали нефрасом марки С2 80/120, сушили, взвешивали и вычисляли количество удаленного порохового нагара.

Результаты и обсуждение

Трибологические испытания.

В табл. 1 представлены результаты испытаний по определению трибологических характеристик новых отечественных УСМ в сравнении с импортными аналогами по нагрузке сваривания (P_c , кгс) и по диаметру пятна износа ($D_{и}$, мм) при нагрузке 20 кгс в течение 1 часа.

Табл. 1. Трибологические характеристики УСМ

№ п/п	Наименование УСМ	P_c , кгс	$D_{и}$, мм
1	Росойл-РЖ	200	0,45
2	Росойл-Вэдэшка	160	0,50
3	WD-40	150	0,75
4	Ballistol Universal	141	0,55
5	Ballistol Gunex	126	0,87

Трибологические испытания УСМ показали, что по предельной нагрузочной способности и противоизносным свойствам наилучшими характеристиками обладает масло «Росойл-РЖ», а наихудшими масло «Ballistol Gunex». При этом различия в значениях показателей этих материалов оказались довольно существенными. По нагрузке сваривания более чем в 1,5 раза, по диаметру пятна износа более чем в 1,9 раза.

Более высокая нагрузка сваривания говорит о лучшей способности масла Росойл-РЖ предотвращать схватывание трущихся поверхностей при возникающих перегрузках в процессе работы. А меньший диаметр пятна износа о большем ресурсе работы узлов и механизмов, работающих без перегрузок, при нормальных условиях эксплуатации.

Таким образом использование масла Росойл-РЖ вместо аналогичных УСМ представленных в табл. 1 позволит увеличить межремонтный срок эксплуатации изделий.

В настоящее время универсальное консервационное ружейное масло «Росойл-РЖ» проходит испытания в 25 ГосНИИ химмотологии и ЦНИИВВС Минобороны России. Окончательный вывод об эффективности масла можно будет сделать после завершения испытаний.

Защитная способность.

Результаты ускоренных испытаний защитной способности УСМ при воздействии нейтрального соляного тумана представлены в табл. 2.

Табл. 2. Защитная способность УСМ

№ п/п	Наименование УСМ	Площадь коррозии, %
1	Росойл-РЖ	0
2	<i>Ballistol Gunex</i>	0
3	Росойл-Вэдэшка	1
4	<i>WD-40</i>	14
5	<i>Barricade</i>	63
6	<i>Ballistol Universal</i>	83
7	РЖ	100
8	КРМ	100
9	Русак	100
10	Калашников	100
11	Тайга	100
12	Беркут	100

Испытания показали, что наилучшей способностью защищать черные металлы от коррозии в атмосфере нейтрального соляного тумана обладают новые российские УСМ «Росойл-РЖ», «Росойл-Вэдэшка» и германское оружейное масло «*Ballistol Gunex*». На пластинках, покрытых УСМ «Росойл-РЖ» и «*Ballistol Gunex*» после 7 ч испытания очагов коррозии не обнаружено. На пластинках, покрытых УСМ «Росойл-Вэдэшка» площадь коррозионного поражения составила всего 1%. Импортные УСМ «*WD-40*», «*Ballistol Universal*» и «*Barricade*» обладают меньшими антикоррозионными свойствами. Площадь коррозии на пластинках покрытых этими материалами составила 14%, 83% и 63% соответственно.

Для сравнения в табл. 2 дополнительно представлены результаты, полученные при испытаниях наиболее распространенных марок отечественных оружейных масел. К сожалению, они обладают плохими защитными свойствами. Очаги коррозии на металлических образцах покрытых маслами «РЖ», «КРМ», «Русак» появились в течение первого часа испытаний, а через 3 часа пластинки полностью покрылись коррозией. Площадь коррозионного поражения пластинок, покрытых маслами торговых марок «Тайга», «Калашников» и «Беркут» уже после 1 часа испытаний составила 100%.

Чистящие свойства

Результаты сравнительных испытаний чистящих свойств УСМ представленные в табл. 3. показали, что по способности удалять пороховой нагар с поверхности металла масло «Росойл-РЖ» превосходит аналогичные материалы зарубежного производства: «*Ballistol Gunex*» в 1,15 раза, «*Ballistol Universal*» в 1,32 раза, «*WD-40*» в 1,43 раза.

Таким образом, масло «Росойл-РЖ» может использоваться для чистки стрелкового оружия от порохового нагара, смазывания механизмов и защиты от коррозии при хранении и эксплуатации.

Табл. 3. Чистящие свойства УСМ

№ п/п	Наименование УСМ	Количество удаленного нагара, %
1	Росойл-РЖ	53
2	<i>Ballistol Gunex</i>	46
3	Росойл-Вэдэшка	42
4	<i>Ballistol Universal</i>	40
5	<i>WD-40</i>	37

Результаты лабораторных испытаний были подтверждены исследованиями эксплуатационных свойств масла «Росойл-РЖ». В результате подконтрольной эксплуатации артиллерийского и стрелкового вооружения с применением для технического обслуживания масла «Росойл-РЖ» в Рязанском гвардейском высшем воздушно-десантном ордена Суворова дважды Краснознаменном командном училище имени генерала В.Ф. Маргелова с 1 октября 2021 года по 1 марта 2022 года установлено, что по общим эксплуатационным свойствам масло «Росойл-РЖ» существенно превосходит штатную ружейную смазку [4].

Заключение

По совокупности результатов проведенных исследований новые отечественные УСМ обладают хорошими трибологическими характеристиками, защитной способностью, чистящими свойствами и могут использоваться взамен импортных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Проект № 79525).

[1] Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. Перераб. и доп./ А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

[2] Топлива, смазочные материалы технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А. Бнатов и др.; Под ред. В.М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596 с.

[3] Шолом В.Ю., Казаков А.М., Абрамов А.Н. Смазочные материалы для защиты металлов от коррозии и коррозионно-механического изнашивания. // Трибология. Состояние и перспективы: сборник научных трудов. В 4-х томах. Главные редакторы И.Г. Горячева и М.А. Броневец. Т.2. Смазка и смазочные материалы / под ред. С.М. Захарова и И.А. Буяновского. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 460-475.

[4] Результаты подконтрольной эксплуатации артиллерийского и стрелкового вооружения с применением для технического обслуживания ружейного масла «Росойл-РЖ». – Рязань: РВВДКУ, 2022. – 13 с.

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СВЕКЛОСАХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Карцев С.В. *, Кравченко И.Н., Карцев И.С.

*E-mail: kazo61@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация.

В работе рассмотрена технология плазменного упрочнения быстроизнашиваемых деталей технологического оборудования свеклосахарного производства, подверженных интенсивному изнашиванию и приводится краткое описание технологии плазменного упрочнения таких деталей. Рассмотрены технологические параметры плазменного упрочнения режущих кромок ножей свеклорезных центробежных свеклорезок. Проведены исследования и даны практические рекомендации по плазменному упрочнению поверхностей режущих кромок ножей центробежных свеклорезок свеклосахарного производства агропромышленного комплекса России в современных условиях.

Ключевые слова: быстроизнашиваемые детали, ножи свеклорезные, плазменное упрочнение, износостойкие покрытия, плазматрон, режимы плазменного упрочнения.

Введение

В современных условиях свеклосахарного производства реальной стратегией обеспечения работоспособности быстроизнашиваемых деталей технологического оборудования становится упрочнение деталей. Упрочнение быстроизнашиваемых деталей выступает как одно из приоритетных направлений ресурсосбережения. К таким деталям в первую очередь относятся ножи центробежных свеклорезок. Это объясняется необходимостью обеспечения технологически важного показателя качества стружки, характеризующего ее длиной, приходящейся на 100 г навески, что является основой рентабельности свеклосахарного производства. Одними из наиболее перспективных методов повышения износостойкости режущей кромки свеклорезного ножа является плазменное упрочнение, наиболее полно удовлетворяющий предъявляемым требованиям.

Материалы и методы

Плазменное упрочнение детали – сложная технологическая задача, при решении которой частично изменяются некоторые ее характеристики.

HIGHLY EFFICIENT TECHNOLOGIES OF PLASMA HARDENING OF FAST-WEARING PARTS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF SUGAR BEET PRODUCTION

Kartsev S.V., Kravshenko I.N., Kartsev I.S.

The paper considers the technology of plasma hardening of fast-wearing parts of technological equipment of sugar beet production, subject to intensive wear and provides a brief description of the technology of plasma hardening of such parts. Technological parameters of plasma hardening of cutting edges of knives of beet-cutting centrifugal beet-cutters are considered. Studies have been conducted and practical recommendations have been given on plasma hardening of the surfaces of the cutting edges of knives of centrifugal beet cutters of sugar beet production of the agro-industrial complex of Russia in modern conditions.

Keywords: quick-wear parts, beet-cutting knives, plasma hardening, wear-resistant coatings, plasma torch, plasma hardening modes.

Этот метод обладает следующими преимуществами:

- не требует применения вакуумных камер, так как процесс упрочнения происходит на воздухе при температуре окружающей среды;
- минимальный нагрев в процессе обработки не вызывает деформаций упрочняемых деталей;
- высокая адгезионная прочность сцепления покрытия с основой обеспечивает максимальную сопротивляемость истиранию;
- низкий коэффициент трения способствует подавлению процессов налипания при резании;
- простота операций по очистке и обезжириванию перед упрочнением;
- минимальное потребление и низкая стоимость расходных материалов [1].

При проектировании и разработке технологического процесса необходимо учитывать технологические, экономические и экологические особенности.

Целью настоящего исследования является решение актуальной задачи по упрочнению режущих кромок ножей центробежных свеклорезок плазменным упрочнением, выбору рациональных

режимов нанесения плазменных покрытий на режущие кромки ножей, подверженных интенсивному износу в процессе эксплуатации. Для решения поставленной задачи в работе приводится технология плазменного упрочнения режущих кромок ножей свеклорезных. Главным конструктивным достоинством данных ножей является отсутствие зон защемления изрезаемого материала, со стороны режущей кромки грани открыты, что позволяет получать стружку высокого качества. Ножи изготавливаются из специального профильного проката двух типов: – безреберные типа 1011-В; – ребристые типа 1017-П. Для изготовления ножей применяется инструментальная сталь марки У8А. Ножи безреберные изготавливаются левые и правые двух исполнений – А и Б. В ножевую раму центробежной свеклорезки устанавливают по одному ножу левому и одному правому исполнения А или Б. При такой установке режущая кромка в стыке двух ножей не нарушается. Общий вид свеклорезного ножа представлен на рис. 1. Режущая кромка ножа складывается из острых граней, расположенных под углом 75°.



Рис. 1. Нож свеклорезный тип 1011-В

Для плазменного упрочнения режущих кромок свеклорезных ножей использовали низкотемпературную плазму, полученную в плазматроне плазменной установки с дополнительным блоком жидкостного питателя (Рис. 2). Используемое для этой цели оборудование является малогабаритным и низкоэнергоемким [2].

В качестве рабочих реагентов жидкостного питателя использовали кремнийорганическую жидкость типа гексаметилдисилизан отечественного производителя.

Работы по нанесению упрочняющих покрытий должны проводиться на специализированном участке при температуре воздуха не ниже +18 °С и влажности не более 70%. Перед пуском плазменной установки необходимо осмотреть состояние электродов плазматрона.

При подготовке и отладке оборудования необходимо отрегулировать положение плазматрона таким образом, чтобы угол между осью сопла и



Рис. 2. Блок жидкостного питателя

упрочняемой поверхностью детали находился в пределах 60-90 градусов. После включения плазменной установки в начале процесса устанавливают режимы упрочнения.

Режимы плазменного упрочнения режущих кромок свеклорезных ножей: ток дуги плазматрона – 200 А, напряжение дуги плазматрона – 40 В, скорость истечения плазмы из сопла плазматрона – 4 л/мин, расход горячих углеводородов – 3–7%, расход плазмообразующего газа – 2,7 м³/ч при давлении 0,2 МПа. Низкотемпературную струю плазмы перемещали вдоль внутренней поверхности режущих кромок свеклорезных ножей со скоростью 3-4 мм/с (Рис. 3).



Рис. 3. Плазменное упрочнение режущих кромок свеклорезных ножей

Результаты и обсуждение

Эксплуатационные испытания свеклорезных ножей с упрочняющим покрытием проводили в реальных производственных условиях ЗАО «КРИСТАЛЛ-БЕЛ» (Россия, Белгородская область, п. Чернянка). Испытаниям подвергались свеклорезные ножи типа 1011-В (производство АО «Шебекинский машиностроительный завод», Россия, Белгородская область), установленные в шестнадцатирамную центробежную машину для нарезания сахарной свеклы модели Т2М-СЦ2Б-16 (Рис. 4).



Рис. 4. Центробежная машина для нарезания сахарной свеклы модели Т2М-СЦ2Б-16

С целью создания идентичных условий испытаний центробежную машину комплектовали двухножевыми рамами по схеме, представленной на рисунке 5 (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 – ножи с упрочняющим покрытием и 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 – ножи без покрытий). Это позволило контролировать техническое состояние свеклорезных ножей и качество свекловичной стружки ежемесячно при проведении технического обслуживания центробежных машин [3,4].

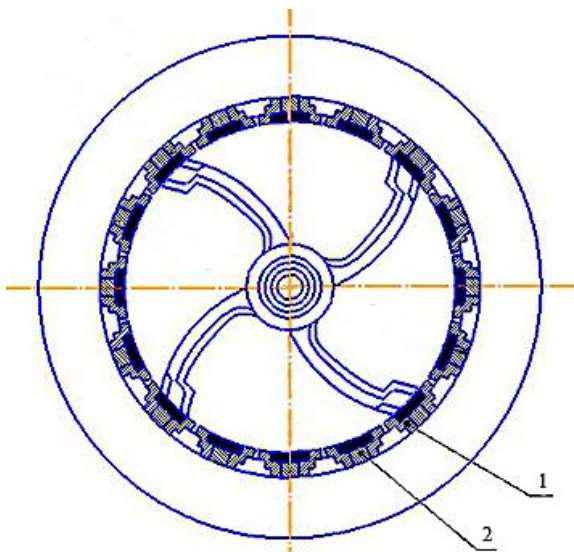


Рис. 5. Схема установки ножевых рам в центробежной машине для нарезания сахарной свеклы мод. Т2М-СЦ2Б-16:
1 – ножи с покрытием; 2 – ножи без покрытия

Регистрацию технического состояния ножей при эксплуатации осуществляли в соответствии с регламентом, установленным на предприятии, согласно которому замену свеклорезных ножей с предельными износами режущих кромок и усталостными разрушениями проводили после окончания каждой смены.

Оценку стойкости производили по периоду стойкости до появления фаски износа на задней

внутренней поверхности режущей кромки свеклорезного ножа I_n (Рис. 6).

Ножи центробежной свеклорезки с износостойким покрытием обеспечивали измельчение сахарной свеклы скользящим резанием. Такое резание позволило получить сахарозосодержащую свекловичную стружку с улучшенными физико-механическими характеристиками, совершенно гладкой поверхностью без изломов и шероховатых кромок. Повышение износостойкости режущих кромок свеклорезных ножей, упрочненных плазменным методом, обеспечило соблюдение размерных параметров свекловичной стружки ромбовидной формы и ее проницаемости. В установленном оптимальном интервале длина стружки в 100 г навески, составила 11–12 метров, ее проницаемость 170–180 л/ч. При этом потери сахарозы не превысили 2–5 %. Данные параметры были обеспечены в начальный период работы центробежной свеклорезки, что является основой рентабельности свеклосахарного производства [5].



Рис. 6. Износ на задней внутренней поверхности режущей кромки ножа центробежной свеклорезки ($I_n = 0,3$ мм).
Увеличение $\times 100$

Заключение

В результате проведенных исследований обоснованы и определены рациональные режимы плазменного упрочнения режущих кромок ножей свеклорезных, что позволит использовать их при проектировании конкретных технологических процессов упрочнения быстроизнашиваемых деталей технологического оборудования свеклосахарного производства агропромышленного комплекса России.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН).

- [1] Соснин Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 406 с.
- [2] Карцев, С.В., Кравченко, И.Н., Гурциев, А.Ю. Установка для плазменного напыления // Патент на полезную модель RU № 66341. – заявка №2007113492/22, 11.04.2007; опубликовано 10.09.2007. Бюллетень №25. – 7с.
- [3] Глинский М.А. Разработка метода нанесения плазменных покрытий для восстановления деталей перерабатывающего оборудования АПК: дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03. – М., 2018. – 239 с.

- [4] Ковылин А.П. Повышение долговечности ножей центробежных свеклорезок восстановлением и упрочнением граней пластическим деформированием: дис. канд. техн. наук: 05.20.03 / Ковылин Анатолий Петрович. – Саратов, 2016. – 211 с.
- [5] Карцев С.В. Повышение износостойкости режущих кромок свеклорезных ножей плазменным методом / С.В. Карцев, И.Н. Кравченко, А.Г. Пастухов, И.С. Карцев. – Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. № 2 (34). С. 9-15.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ В ЗОНЕ КОНТАКТА С РЕЛЬСАМИ КОЛЕС КАРЬЕРНЫХ ЛОКОМОТИВОВ НА ИХ ТЯГОВУЮ СПОСОБНОСТЬ

Керопян А.М.

E-mail: am_kerop@mail.ru

Общество с ограниченной ответственностью «Московский научно-исследовательский проектно-
изыскательский институт технологий и инноваций», Москва, Российская Федерация.

В результате теоретических исследований установлено, что на тяговое усилие карьерного локомотива существенное влияние оказывают такие факторы, как: температура в зоне контакта системы колесо-рельс; микрогеометрия зоны контакта; макрогеометрия взаимодействующих поверхностей; осевая нагрузка. Определено, что для обеспечения критерия прочности и учитывая повышенные осевые нагрузки карьерных локомотивов следует ограничить температуру в зоне контакта системы колесо – рельс в пределах 300 °С с помощью контроля скорости скольжения колеса относительно рельса. Кроме того выявлено, что для эффективного функционирования карьерного рельсового транспорта необходимо обеспечить условия, обеспечивающие конформный контакт при взаимодействии обработанных рабочих поверхностей рельсов шероховатостью Rz 20-40 мкм.

Ключевые слова: температура в зоне контакта системы колесо-рельс; микрогеометрия зоны контакта; микрогеометрия взаимодействующих поверхностей; осевая нагрузка; конформный контакт.

Введение

На интенсивность взаимодействия при трении деталей системы колесо – рельс оказывают влияние параметры внешнего воздействия, среди которых

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE MAIN FACTORS IN THE AREA OF CONTACT WITH THE RAILS OF THE WHEELS OF QUARRY LOCOMOTIVES ON THEIR TRACTION CAPACITY

Keropyan A.M.

As a result of theoretical studies, it has been established that the traction force of a quarry locomotive is significantly influenced by such factors as: temperature in the contact zone of the wheel-rail system; microgeometry of the contact zone; macrogeometry of interacting surfaces; axial load. It is determined that in order to ensure the strength criterion and taking into account the increased axial loads of quarry locomotives, the temperature in the contact zone of the wheel-rail system should be limited to 300 °C by controlling the sliding speed of the wheel relative to the rail. In addition, it was revealed that for the effective functioning of quarry rail transport, it is necessary to provide conditions that ensure conformal contact during the interaction of the treated working surfaces of rails with a roughness of Rz 20-40 microns.

Keywords: temperature in the contact zone of the wheel-rail system; microgeometry of the contact zone; macrogeometry of interacting surfaces; axial load; conformal contact.

наиболее важную роль играют осевая нагрузка, скорость относительного скольжения тяговых колес локомотивов, температура в зоне контакта колесной пары с рельсом [1, 2].

Кроме отмеченных выше факторов, не менее важную роль играет микрогеометрия (шероховатость) взаимодействующих поверхностей системы колесо – рельс [3, 4]. Всё дело в том, что действующие в классической механике законы основаны на исследованиях Кулона, Амонтона, Герца и др., которые не учитывают шероховатость взаимодействующих поверхностей. При этом все поверхности считаются абсолютно гладкими.

Также следует отметить, что в международной практике железнодорожного движения для обеспечения минимальных контактных напряжений при движении используют специальные профили колеса и рельса, которые называют конформными [5]. Кроме того, Э.М. Френкель экспериментально установил, что «...с увеличением диаметра окружности катания колеса от 836 мм до 1400 мм (на 40,3 %) коэффициент сцепления увеличивается от 0,206 до 0,267 (на 22,8%)» [6]. Таким образом, макрогеометрические параметры взаимодействующих поверхностей также имеют существенное значение для повышения тягового усилия локомотивов.

Материалы и методы исследований

Современная наука о трении, которой является ТРИБОЛОГИЯ, развивающаяся на основе трудов И.В. Крагельского, А.В. Чичинадзе, Н.Б. Демкина, Ю.М. Лужнова и их учеников, утверждает, что сила трения в зоне контакта взаимодействующих поверхностей зависит от более, чем пятидесяти параметров. Для магистрального железнодорожного транспорта методом ранжирования в работах Ю.М. Лужнова для условий магистрального железнодорожного транспорта выявлены 10 наиболее актуальных параметров, приведенных в (табл. 1) [3].

Анализ параметров, приведенных в табл. 1 показал, что не все приведенные характеристики могут являться актуальными для карьерного железнодорожного транспорта. Например, учитывая сравнительно низкие скорости перемещения карьерного рельсового транспорта (порядка 20-30 км/ч) при движении по выездной траншее карьера, показатель №9 может оказаться не актуальным. Кроме того, наоборот, для условий карьерного рельсового транспорта могут оказаться актуальными новые показатели или изменится весомость имеющихся, приведенных в табл. 1. Например, по показателю №8 исследования, проведенные А.М. Керопяном для условий Бородинского угольного разреза Красноярского отделения СУЭК, загрязненность рабочих поверхностей рельсовых путей значительно

Табл. 1. Актуальные параметры, влияющие на тяговую способность магистрального железнодорожного транспорта

№	Название параметра	Процент влияния, %
1	Осевая нагрузка	9,55
2	Физико-химические свойства контактирующих поверхностей	8,99
3	Скорость скольжения колеса по рельсу	8,71
4	Предварительное упругое смещение материала колеса относительно материала рельса	8,43
5	Поверхностная твердость материалов колес и рельсов (вид контакта: упругий или пластический)	8,22
6	Скорость движения локомотива	7,87
7	Фактическая площадь контакта колеса с рельсом	7,23
8	Толщина слоя поверхностных загрязнений	7,02
9	Влажность приповерхностных слоев воздуха, климатические и метеорологические условия	6,74
10	Макрогеометрия контактирующих тел – профили бандажа и головки рельса	6,32
	Суммарный процент влияния	79,08

превышает по количеству и составу аналогичные показатели для магистрального железнодорожного транспорта [7,8].

Следует отметить, что условия эксплуатации карьерного рельсового транспорта существенно отличаются от соответствующих параметров рельсового транспорта общего пользования (табл. 2).

Табл. 2. Характерные отличительные особенности эксплуатации карьерного рельсового транспорта от магистрального

№	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение	
			Магист. трансп.	Карьер. трансп.
1	Осевая нагрузка	кН	до 250,0	До 310,0
2	Скор. движ. локомотива	км/ч	до 150,0	до 30,0
3	Уклон (угол подъема) рельсового пути	‰,(промилле)	до 10,0	до 80,0
4	Минимальный радиус кривизны рельс. пути	м	500,0	40,0...60,0
5	Применение «старогодних» рельсов		-*	+*
6	Характеристика рельсовых путей		Стационарные	Передвижные**

* «+» - применяются; «-» - не применяются;

** балластная призма отсутствует.

Сравнительный анализ факторов, приведенных в табл. 2 показал, что практически по всем сравниваемым показателям условия эксплуатации карьерного рельсового транспорта значительно хуже, чем условия магистрального железнодорожного транспорта. На рис. 1 приведены основные факторы, определяющие величину тягового усилия карьерного локомотива.



Рис. 1. Основные факторы, определяющие величину тягового усилия карьерного локомотива

Анализ основных (доминирующих) факторов, представленных на рис. 1 показал, что на тяговое усилие карьерного локомотива существенное влияние оказывают такие факторы, как:

- температура в зоне контакта системы колесо-рельс;
- микрогеометрия зоны контакта;
- макрогеометрия взаимодействующих поверхностей;
- осевая нагрузка.

Рассмотрим степень зависимости каждого из приведенных выше факторов от эксплуатационных параметров карьерного рельсового транспорта.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований показывают, что на температуру в зоне контакта существенное влияние могут оказывать скорость скольжения колеса относительно рельса и уклон рельсового пути. В связи с тем, что уклон карьерного рельсового пути в 5...8 раз превышает соответствующий показатель магистрального рельсового транспорта, контроль температуры имеет актуальное значение. Для обеспечения критерия прочности и учитывая повышенные осевые нагрузки карьерных локомотивов следует **ограничить температуру в зоне контакта системы колесо – рельс в пределах 300 °С** [8, 9, 10]. Ограничению температуры в зоне контакта может способствовать контроль скорости скольжения колеса локомотива относительно рельса и устранение разгрузки передней пары колес локомотива с применением запатентованных технических решений [11, 12].

Немаловажное значение для тяговой способности карьерного локомотива имеет

микрогеометрия зоны контакта. В связи с тем, что контакт шероховатых поверхностей, каковыми являются рабочие поверхности пары колесо – рельс, является дискретным, для повышения тягового усилия локомотива необходимо увеличить силу трения в зоне контакта взаимодействующих поверхностей. Исследования, выполненные в работах А.В. Чичинадзе, Н.Б. Демкина позволяют выявить такие критерии [4, 13]. Например, Н.Б. Демкин считает, что сила трения зависит от **фактической площади контакта взаимодействующих тел**, которая в свою очередь зависит от «...высоты микронеровностей и радиусов закругления вершин микронеровностей» [4].

Для конкретных типов локомотивов один из **макрогеометрических** параметров, диаметр тяговых колес, есть величина постоянная. Однако, другой параметр, радиусы сопрягаемых поверхностей взаимодействующих поверхностей пары колесо рельс, могут иметь существенное влияние на величину площадки контакта (с точки зрения обеспечения **конформного контакта**). В результате многочисленных исследований установлено, что в процессе взаимодействия новые профили колеса и рельса прирабатываются и становятся конформными, т.е. имеющими идентичную форму. Но для получения конформного контакта требуется определенное количество часов для приработки профилей. Поэтому в результате проведенных исследований А.М. Керопян получил «...зависимость радиуса кривизны рабочей поверхности головки рельса **при односточном контакте** (для прямых участков рельсового пути):

$$R = \frac{r(r - \sqrt{r^2 - l^2})}{S + r - \sqrt{r^2 - l^2}} \quad (1)$$

и зависимость радиуса кривизны рабочей поверхности головки рельса **при двухточечном гребневом контакте** (для криволинейных участков)

$$R = \frac{\Delta r - r^2 - (\Delta - r)\sqrt{r^2 - l^2}}{\Delta - r + \sqrt{r^2 - l^2}} \quad (2)$$

где r и R – радиусы рабочих профилей соответственно колеса и рельса; $l = 1/2 \cdot AB$ – полуширина полоски контакта; S и Δ – зазоры между рабочими поверхностями контактирующих поверхностей системы колесо – рельс при односточном и двухточечном контактах (соответственно)» [7].

Одним из актуальных параметров, приведенным табл. 1, влияющим на тяговую способность железнодорожного транспорта,

является осевая нагрузка, имеющая самый большой процент влияния (9,55 %). Известно, что чем больше оказываемое колесной парой давление па поверхность рельса, тем большее тяговое усилие можно получить. Однако, прочностные характеристики рельсов не безграничны. Здесь следует выполнять расчеты на **контактную прочность сопрягаемых деталей** по разработанным методикам. Известно, величина контактного σ_k напряжения может быть определена по формуле

$$\sigma_k = \frac{N}{S_\phi} \quad (3)$$

где N – осевая нагрузка, действующая перпендикулярно поверхности рельса,
 S_ϕ – фактическая площадь контакта взаимодействующих поверхностей.

Как видим, из формулы (3) следует, что для снижения контактных напряжений необходимо обеспечить увеличение фактической площади контакта взаимодействующих поверхностей.

Исследованиями И.В. Крагельского, Н.М. Михина установлено, что для условий, свойственных карьерному рельсовому транспорту, характерны «...два вида контакта: **упругий насыщенный и пластический насыщенный**» [14]. Теоретическими исследованиями А.М. Керопяна, установлено, что «...для пластического насыщенного контакта при увеличении контурного давления и комплексного показателя шероховатости коэффициент трения увеличивается» [7]. Следовательно, следует предположить, что для эффективного функционирования карьерного рельсового транспорта необходимо обеспечить для взаимодействующих поверхностей условия, свойственные пластическому насыщенному контакту. Такие условия могут быть реализованы при взаимодействии обработанных рабочих поверхностей рельсов шероховатостью R_z 20-40 мкм, обеспечивающих конформный контакт. При этом, будет сокращена продолжительность процесса приработки пары колесо – рельс, что в свою очередь продлит срок эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта.

Выводы

1. На тяговое усилие карьерного локомотива существенное влияние оказывают такие факторы:

- температура в зоне контакта колесо-рельс;
- микрогеометрия зоны контакта;
- макрогеометрия рабочих поверхностей;
- осевая нагрузка.

2. Для обеспечения критерия прочности и учитывая повышенные осевые нагрузки карьерных локомотивов следует **ограничить температуру в зоне контакта системы колесо – рельс в пределах 300 °С** с помощью контроля скорости скольжения колеса относительно рельса.

3. Для эффективного функционирования карьерного рельсового транспорта необходимо обеспечить для взаимодействующих поверхностей условия, **свойственные пластическому насыщенному контакту**. Такие условия могут быть реализованы при взаимодействии обработанных рабочих поверхностей рельсов шероховатостью R_z 20-40 мкм, обеспечивающих конформный контакт.

4. Учитывая условия эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта, для реализации высокой тяговой способности локомотивов необходимо плановое профилирование рабочих поверхностей карьерных рельсов для создания **конформного контакта** в зоне сцепления пары колесо – рельс в соответствии с разработанными рекомендациями.

5. В связи повышенными уклонами карьерной выездной траншеи для контроля температуры в зоне контакта системы колесо – рельс целесообразно реализовать устранение разгрузки передней пары колес локомотива путем смещения центра масс локомотива на некоторую величину с применением запатентованных технических решений.

[1] Джост П. Мировые достижения в области трибологии. / АН Белоруссии // Трение и износ. Т. 8. №8. 1987. С. 5-24.

[2] Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: справочник. М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

[3] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М., Машиностроение. 1977, – 526 с..

[4] Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М., Наука, 1970, – 227 с.

[5] Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. //Пер. с англ. У.Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн и др.: «Интертекст». 2002. – 408 с.

[6] Френкель Э.М. К вопросу о сцеплении колеса с рельсом. / Труды ХИИТ, вып. 23. Трансжелдориздат. 1953.

[7] Керопян А.М. Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо-рельс карьерных локомотивов в режиме тяги.: дис. докт. тех. наук: 05.05.06: защищена 23.12.2015/ Керопян Амбарцум Мкртичевич. – Екатеринбург, 2015. – 233 с. – Библиогр.: С. 208-223.

[8] Керопян А.М. Влияние загрязнений и температуры в зоне контакта колес карьерных локомотивов на их тяговую способность. // Сборник трудов XI международной научно-технической конференции "Чтения памяти В.Р. Кубачека" ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГОРНОЙ И НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. 04 - 05 апреля 2013г. Екатеринбург, – С. 386-390.

[9] Лужнов Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. - М.: Интекст, 2009. – 176 с.

[10] Керопян А. М., Шахова К. И. Исследование влияния температуры и состава поверхностных загрязнений в зоне контакта колес карьерных локомотивов на их тяговую способность // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – №. 9. – С. 30-36.

[11] Пат. 2489286 Российская Федерация, МПК В61С 15/08. Устройство для обнаружения начала процесса буксования колесных пар локомотива. / А.М. Керопян, Ю.Е. Бабичев.; заявитель и патентообладатель - М., ГОУ ВПО МГТУ (RU). - № 2011105769/11; заявл. 17.02.2011; опубл. 10.08.2013 в Бюл. № 22.

[12] Патент РФ на изобретение № 2572443 от 04.02.2014. Бюл. № 1 от 10.01.2016 «Способ устранения разгрузки осей колесных пар карьерных локомотивов при трогании с места и движении на наклонных участках железнодорожного пути.// Керопян А.М., Дмитриев В.Г., Маслов М.И.

[13] Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для техн. вузов./ Под ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.

[14] Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Трибологические свойства многослойных покрытий CrN/TiN на медно-бериллиевом сплаве, нанесенных методом вакуумно-дугового осаждения, при трении в режиме граничной смазки

¹Колубаев А.В. *, ¹Сизова О.В., ²Денисова Ю.А., ²Леонов А.А., ¹Терюкалова Н.В.,
¹Новицкая О.С., ³Белый А.В.

*E-mail: kav@ispms.ru

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия;

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия;

³Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь.

Представлены результаты исследования структуры и свойств многослойных покрытий, состоящих из чередующихся слоев CrN/TiN на состаренном медно-бериллиевом сплаве БрБ2. Покрытия были нанесены методом катодно-дугового осаждения с использованием двух мишеней, изготовленных из хрома и титана в атмосфере смеси газов (N₂(90%)+Ar(10%)). Показано, что на поверхности образцов медно-бериллиевого сплава формируются покрытия, состоящие из слоев нитридов с четко разделенными слоями субмикронного масштаба. Нанотвердость нанесенных многослойных покрытий достигала 28 ГПа у 16-слойного и 31 ГПа у 32-слойного покрытия. При трибоиспытаниях были определены коэффициенты трения, которые в зависимости от времени ведут себя одинаково для 16- и 32-слойного покрытий. Было показано, что с увеличением нагрузки от 1 Н до 5 Н износ покрытий был незначительным.

Ключевые слова: медно-бериллиевый сплав, ионно-плазменные покрытия, микроструктура, рентгеноструктурный анализ, трение.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CrN/TiN MULTILAYER COATINGS ON COPPER-BERYLLIUM ALLOY APPLIED BY VACUUM ARC DEPOSITION UNDER FRICTION IN BOUNDARY LUBRICATION MODE

Kolubaev A.V., Sizova O.V., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Teryukalova N.V., Novitskaya O.S., Byeli A.V.

This study investigates the structure and properties of multilayer coatings consisting of alternating CrN/TiN layers deposited on aged C17200 beryllium-copper alloy. The coatings are produced by cathodic arc plasma deposition using two chromium and titanium cathodes in the atmosphere of a mixture of gases (N₂(90%)+Ar(10%)). It is shown that coatings formed on the surface of beryllium-copper alloy consist of well-separated submicron nitride layers. The nanohardness of the deposited multilayer coatings reaches 28 GPa for a 16-layer and 31 GPa for a 32-layer coating. The adhesive strength is studied by scratch testing. The behavior of multilayer coatings is investigated in tribological tests with boundary lubrication. The friction coefficients determined in tribological tests behave similarly depending on time for coatings on beryllium-copper alloy. It was shown that with an increase in the load from 1 N to 5 N, the wear of the coatings was insignificant.

Keywords: copper-beryllium alloy, ion-plasma coatings, microstructure, X-ray diffraction, friction.

Введение

Бериллиевая бронза БрБ2 в состаренном состоянии обладает высокими механическими свойствами, хорошей коррозионной стойкостью и электропроводностью, широко применяется в аэрокосмической, нефтехимической и машиностроительной областях для производства упругих элементов, зубчатых колес, опор скольжения, диафрагм, электрических контактов и т.д. [1].

С целью улучшения износостойкости этого сплава применяют метод модифицирования поверхности, то есть получения твердых интерметаллических покрытий за счет диффузии отдельных элементов в поверхностные слои или осаждения ионно-плазменными методами. К числу наиболее широко применяемых твердых покрытий относятся покрытия на основе нитридов металлов. В результате такой обработки на поверхности сплава образуются слои, обеспечивающие заметное повышение трибологических свойств бериллиевой бронзы и других медных сплавов. Вместе с тем существуют ограничения использования твердых покрытий, формируемых на относительно мягких подложках. Это обусловлено действием высоких остаточных микронапряжений на границе раздела покрытие-металл, вызывающих отслоение покрытия при значительных внешних воздействиях [2]. Следует отметить, что при трибологическом назначении покрытий, в том числе и нитридов металлов, адгезия является наиболее важным свойством и тесно связана со сроком службы деталей, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. Эффективным способом снижения остаточных напряжений и повышения адгезии покрытия к подложке является создание твердого покрытия, нанесенного на промежуточный слой, который имеет высокую адгезию к подложке. Так, образование промежуточного слоя Ti на медной подложке улучшает адгезионные свойства покрытия TiN, поскольку промежуточный слой Ti имеет хорошую адгезию с оксидами между подложкой и TiN [3]. Кроме того, роль промежуточного слоя титана заключается в растворении оксидного слоя, оставшегося на поверхности подложки, а также в снятии напряжения сдвига на границе раздела. В ряде работ было показано преимущество нанесения многослойных покрытий перед однослойными, состоящее, главным образом, в том, что формирование многослойной структуры позволяет улучшить адгезию покрытия к подложке, уменьшить величину внутренних напряжений и, соответственно, повысить вязкость разрушения и улучшить трибологические свойства покрытия [4].

Из существующих современных технологий нанесения многослойных покрытий на подложки из широкого класса материалов наиболее распространенными способами являются магнетронное [5] и вакуумно-дуговое напыление [1, 6]. Вакуумно-дуговое напыление, благодаря высокой, более 90 %, ионизации металлической плазмы, обеспечивает наилучшую адгезию покрытий к подложке среди других методов.

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что поиск новых методов упрочнения бериллиевой бронзы и оптимизация существующих технологий являются сегодня одним из главных научных направлений в области комплексных исследований, направленных на изучение физико-механических свойств и закономерностей формирования структуры функциональных материалов с модифицированной поверхностью.

Целью данной работы является изучение структуры и трибологических свойств многослойных покрытий состава CrN/TiN, нанесенных на медно-бериллиевый сплав С17200 вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом в газо-металлической плазме разрядов низкого давления.

Материалы и методы

Покрытия состава CrN/TiN/...CrN/TiN были получены на образцах медно-бериллиевого сплава БрБ2, изготовленных из горячекатаного прутка диаметром 20 мм. Образцы из сплава БрБ2 были состарены при температуре 320 °С после закалки. Покрытия наносили методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения в вакуумной камере. После очистки поверхности образцов ионной бомбардировкой и достижения требуемой температуры производилось напыление покрытий. Перед получением многослойных покрытий (16 и 32 слоя) на подложку наносили слой титана толщиной до 100 нм в атмосфере аргона. Многослойное покрытие с чередующимися слоями TiN и CrN формировали путем последовательного включения и выключения двух дуговых испарителей с катодами, изготовленными из титана марки ВТ1-0 и хрома чистотой 99,5% в смеси газов (N₂(90%)+Ar(10%)) при давлении 0,6 Па. Были подобраны токи дуговых испарителей и напряжение смещения на подложку в процессе роста покрытий.

Структуру и фазовый состав полученных покрытий исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 6000 в Томском региональном центре коллективного пользования (ТРЦКП) при Томском государственном университете. Измерения проводили с использованием

CuK α излучения, фазовый состав покрытий определяли с помощью программы PowderCell. Морфологию и толщину поверхностного слоя анализировали методами оптической и растровой электронной микроскопии на лазерном конфокальном микроскопе «LEXT OLS4000» в оптическом и лазерном режимах, а также на сканирующем электронном микроскопе «Quanta» (ТРЦКП при ТГУ) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором.

Трибологические испытания образцов проводили на триботестере фирмы «TRIBOtechnic» (Франция) при нагрузке 1, 3 и 5 Н и скорости скольжения $V = 0,1$ м/с в течение 2 часов. Скольжение осуществляли в воздушной среде при комнатной температуре с граничной смазкой по схеме «шарик на диске». Смазкой служило минеральное моторное масло SAE 30W «Fuchs». Контртелом при изнашивании многослойных покрытий на сплаве БрБ2 служил шарик из оксида алюминия Al_2O_3 . Глубину внедрения контртела в покрытие измеряли с помощью конфокального лазерного микроскопа LEXT OLS4000.

Результаты и обсуждение

Поперечные сечения и состав многослойных покрытий на образцах бериллиевой бронзы изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии. Для примера на рисунке 1 приведены данные о 32-слойном покрытии. На рисунке видны хорошо выраженные слои нитридов титана и хрома с четкими границами раздела без трещин и пустот, что свидетельствует о хорошем качестве нанесенных покрытий. Анализ микрофотографий и данных элементного анализа покрытия указывает на приблизительную толщину слоев в 32-слойном покрытии, которая равна 125 нм. В 16-слойном покрытии толщина слоев составила 250 нм.

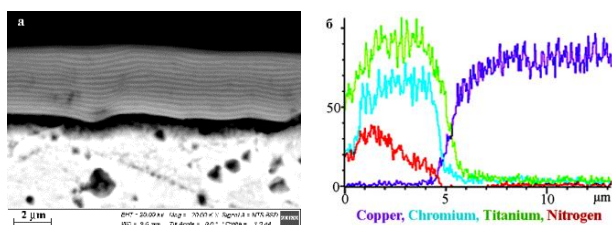


Рис. 1. РЭМ-изображение поперечного сечения 32-слойного покрытия CrN/TiN на медно-бериллиевом сплаве (а) и распределение элементов в покрытии (б)

Рентгеноструктурные исследования показали, что рентгенограммы 16- и 32-слойного покрытия на сплаве БрБ2 содержат рефлексы соединения CuBe, нитридов титана и хрома, а также меди. (на рис. 2 приведена для примера рентгенограмма 16-слойного покрытия).

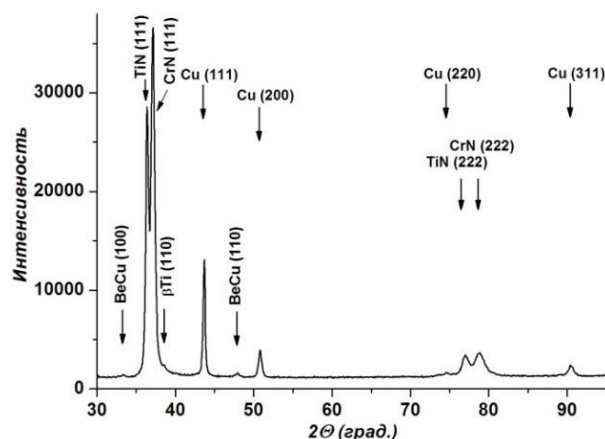


Рис. 2. Рентгенограмма 16-слойного покрытия CrN/TiN, полученного на сплаве БрБ2

Присутствие на рентгенограммах только отражений (111), (222) CrN и TiN указывает на наличие кристаллографической текстуры в слоях нитридов. Имеются сведения, что текстура нитридных слоев зависит от напряжения смещения и давления азота при напылении покрытий [7]. Условия, при которых происходит изменение структурного состояния от поликристаллического до текстурированного с осью [111], соответствуют нашему случаю осаждения нитридных покрытий.

Измерение нанотвердости многослойных покрытий CrN/TiN осуществляли на приборе CSM-Instruments (Швейцария) при нагрузке 20 мН в Томском региональном центре коллективного пользования. Нанотвердость многослойных покрытий на бериллиевой бронзе с покрытиями 16 и 32 слоя составила 28 и 31 ГПа соответственно, тогда как микротвердость этих покрытий, измеренная на приборе ПМТ-3М, составила 14 и 13 ГПа соответственно. Необходимо отметить, что на микротвердость покрытий влияет подложка, поскольку отношение глубины внедрения индентора к толщине покрытия составила в нашем случае около 60%. Для получения достоверных результатов она не должна превышать 10% [8]. Это является причиной того, что микротвердость покрытий значительно меньше, чем нанотвердость. Сравнение микротвердости многослойных покрытий TiN/CrN и твердости однослойного покрытия TiN на меднобериллиевом сплаве, которая была равной 7,6 ГПа [9], указывает на то, что более высокая твердость многослойных покрытий обусловлена наличием границ раздела между слоями.

Результаты трибологических испытаний в условиях граничной смазки показали, что многослойные покрытия на сплаве БрБ2 с последовательностью слоев CrN/TiN...CrN/TiN на подслое титана обладают хорошей

износостойкостью при трении о шарики из оксида алюминия при нагрузках до 5 Н. На рисунке 3 показаны фрагменты дорожек трения покрытий из 16 слоев на медно-бериллиевом сплаве при трении с нагрузкой 1 Н (а) и 5 Н (б).

Видно, что признаков катастрофического разрушения покрытий и трещин на дорожках трения не наблюдается. При трении с нагрузкой 1 Н следы износа у покрытия на сплаве БрБ2 отсутствуют. При нагрузке 5 Н на дорожке трения виден след от шарика. Возможно, след обусловлен намазыванием частиц износа с пленкой масла на твердое покрытие. В пользу этого свидетельствует малая глубина дорожки трения (рисунок 3), которую измеряли с помощью лазерного сканирования перпендикулярно дорожке трения. Подобные результаты имели место и при трении 32-слойного покрытия. В целом износ покрытий в обоих случаях был незначительным. Следует отметить, что рассмотренные в данной работе многослойные покрытия сохраняют свои противозносные свойства при увеличении нагрузки, поскольку периодическое чередование слоев нитрида хрома и нитрида титана позволяет эффективно снижать динамические напряжения и предотвращать образование трещин, что является одним из основных факторов разрушения покрытий.

Триботехнические испытания многослойных покрытий показали, что коэффициенты трения в зависимости от времени ведут себя одинаково для покрытий с разным количеством слоев. При увеличении нагрузки от 1 Н до 5 Н коэффициенты трения снижаются. На рис. 4 показаны временные зависимости коэффициентов трения 16-слойного (а) и 32-слойного (б) покрытий, нанесенных на медно-бериллиевый сплав.

Коэффициенты трения покрытий на медно-бериллиевом сплаве при нагрузке 1 Н изменяются периодически с частотой $0,2 \text{ с}^{-1}$ в пределах от 0,17 до 0,19 у 16-слойного покрытия и от 0,175 до 0,19 у 32-слойного. Характер такого поведения покрытий при трении шарика из оксида алюминия при нагрузке 1 Н можно объяснить посредством механизма прерывистого скольжения (stick-slip), при котором на шарик налипают частицы износа, что препятствует равномерному скольжению. При нагрузках 3 и 5 Н коэффициенты трения многослойных покрытий на медно-бериллиевом сплаве равны 0,12 и 0,10 соответственно (рис. 4).

Заключение

Многослойные покрытия CrN/TiN/...CrN/TiN наносили методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения на образцы состаренного медно-бериллиевом сплава БрБ2.

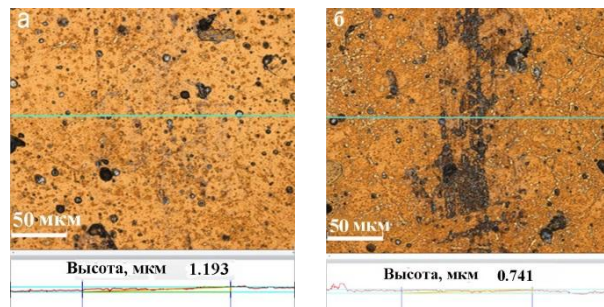


Рис. 3. Следы износа на 16-слойных покрытиях CrN/TiN: на медно-бериллиевом сплаве при нагрузке 1 Н (а) и 5 Н (б)

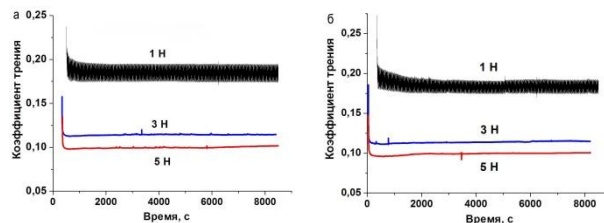


Рис. 4. Зависимости коэффициентов трения от времени скольжения 16-слойного (а) и 32-слойного (б) покрытий TiN/CrN, нанесенных на медно-бериллиевый сплав

Металлографические исследования показали, что покрытия имеют многослойную структуру с хорошо видимыми границами между слоями, толщина которых составила ~ 125 и ~ 250 нм у 32-слойных и 16-слойных покрытий соответственно. Наличие четких и гладких границ раздела между слоями указывает на отсутствие перемешивания компонентов слоя. Слои CrN и TiN имели однофазную ГЦК-структуру типа NaCl (B1) с сильной текстурой, что проявляется только в наличии пиков семейства плоскостей $\{111\}$.

Высокая твердость многослойных покрытий CrN/TiN на сплаве БрБ2 обеспечила хорошую износостойкость при нагрузках до 5 Н. Анализ трибологических испытаний при нагрузках 1, 3 и 5 Н показал, что признаков катастрофического разрушения покрытий и трещин на дорожках трения не наблюдается. В целом износ многослойных покрытий на медно-бериллиевом сплаве был незначительным и соответствовал механизму микроабразивного износа.

Работа выполнена в рамках Программы Государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-0006.

[1] Тебякин А.В., Фоканов А.Н., Подуражная В.Ф. Многофункциональные медные сплавы // Труды ВИАМ. – 2016. - №12(48). – С. 37-44.

[2] Белый А.В., Кукареко В.А., Рубцов В.Е., Колубаев А.В. Сдвиговая пластическая деформация и износостойкость ионно-модифицированных материалов с твердыми слоями // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. - № 1. – С. 51-57.

[3] Kim G.S. et al. Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Т. 171. – №. 1-3. – С. 83-90.

- [4] Zhao F. et al. Tribological and mechanical properties of hardness-modulated TiAlSiN multilayer coatings fabricated by plasma immersion ion implantation and deposition // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 402. – С. 126475.
- [5] Huang X., Etsion I., Shao T. Effects of elastic modulus mismatch between coating and substrate on the friction and wear properties of TiN and TiAlN coating systems // Wear. – 2015. – Т. 338. – С. 54-61.
- [6] Zhang X. et al. Evaluation of the adhesion and failure mechanism of the hard CrN coatings on different substrates // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Т. 364. – С. 135-143.

- [7] Sobol O.V. et al. Structural engineering of multilayer TiN/CrN system obtained by the vacuum arc evaporation // J. Nano- Electron. Phys. – 2015. – Т. 7. – №. 1. – С. 01034.
- [8] Lofaj F., Németh D. The effects of tip sharpness and coating thickness on nanoindentation measurements in hard coatings on softer substrates by FEM // Thin Solid Films. – 2017. – Т. 644. – С. 173-181.
- [9] Колубаев А.В., Сизова О.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Терюкалова Н.В., Белый А.В. Износостойкость медно-бериллиевого сплава с покрытием Cu-Ti // Трибология - Машиностроению. Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 121-124.

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСМИССИОННОГО МАСЛА ТМ5-18

Коноплев В.Е. *, Пикина А.М., Лапсарь О.М., Ветрова С.М.

*E-mail: konoplev@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

В работе проведено исследование влияния двух ингибиторов коррозии (нитрованного масла Акор-1 и олеамидоэтилбората Телаз-ЛС) в составе трансмиссионного масла ТМ5-18 на задиростойкость, а также на стабильность характеристик износостойкости при испытаниях на ресурс. Показано, что смазочная композиция ТМ5-18 + 10% Телаз-ЛС во всем диапазоне нормальных сил демонстрирует снижение скорости изнашивания по сравнению с чистым ТМ5-18 и смазочной композицией ТМ5-18 + 10% Акор-1, в то время как, амплитуды колебаний при использовании ТМ5-18 + 10% Телаз-ЛС существенно больше, особенно по сравнению с композицией ТМ5-18 + 10% Акор-1, при использовании которой в ряде случаев амплитуды и период визуально не могут быть зафиксированы.

Ключевые слова: трение, трансмиссионное масло, износ, смазочная композиция.

Введение

Надежность машин в значительной степени обусловлена надежностью работы их подвижных соединений. К важным факторам, снижающим надежность техники, относятся износ трущихся поверхностей, а также коррозия. Для того чтобы уменьшить износ и увеличить срок службы техники в трибосопряжениях механизмов вводят специальные смазочные композиции, основой которых являются минеральные и синтетические масла [1-10], а для замедления процессов коррозии металлов широко применяются ингибиторы [11-13]. Преимущество использования присадок заключается в том, что

RESEARCH OF LUBRICATING COMPOSITIONS BASED ON TM 5-18 TRANSMISSION OIL

Konoplev V.E., Pikina A.M., Lapsar O.M., Vetrova S.M.

In this work, we studied the effect of two corrosion inhibitors (nitrated oil Akor-1 and oleamidoethyl borate Telaz-LS) in the composition of transmission oil TM5-18 on scuff resistance, as well as on the stability of wear resistance characteristics during life tests. It is shown that the lubricating composition TM5-18 + 10% Telaz-LS in the entire range of normal forces demonstrates a decrease in the wear rate compared to pure TM5-18 and the lubricating composition TM5-18 + 10% Akor-1, while the oscillation amplitudes when using TM5-18 + 10% Telaz-LS, it is significantly higher, especially in comparison with the composition TM5-18 + 10% Akor-1, when using which, in some cases, the amplitudes and period cannot be visually fixed.

Keywords: friction, transmission oil, abrasion, lubricant composition.

можно одновременно значительно уменьшить износ трущихся поверхностей и затормозить коррозионное разрушение металлов и их сплавов при небольших затратах без принципиального изменения технологических схем.

В настоящее время проводятся многочисленные исследования, связанные с поиском новых и изучением уже существующих присадок. Однако использование антикоррозионных добавок может улучшать, ухудшать или не оказывать влияния на прирабатываемость трущихся поверхностей, поэтому при легировании масла необходимо исследовать влияние присадок на задиростойкость, а

также на стабильность характеристик износостойкости при испытаниях на ресурс.

Целью данной работы было изучение влияния ингибиторов коррозии разных типов (нитрованного масла Акор-1 [14] и олеамидоэтилбората Телаз-ЛС [15]) на трибологические характеристики трансмиссионного масла ТМ5-18.

Материалы и методы

Объектами испытаний являются масло трансмиссионное ТМ5-18 ГОСТ 23652-79 SAE85W90 API GL-5, производства ОАО «Новоуфимский НПЗ» (г. Уфа-37), ТМ5-18 + 10% Акор-1 (1) и ТМ5-18 + 10% Телаз-ЛС (2).

Испытательное оборудование – стандартная машина трения типа Амслер-«МИ», модернизированная с целью повышения точности и достоверности и уменьшения сроков проведения экспериментов, снабженная системами создания, поддержания и измерения температур, нормальных сил, линейных скоростей скольжения, моментов сил трения, скоростей изнашивания и т.д.

Схема трения – «колодка-ролик» с постоянными величинами коэффициентов взаимного перекрытия и площади соприкосновения независимо от износа – важный фактор достоверности получаемых экспериментальных результатов.

Методика эксперимента согласно [16,17] состоит в организации вращения ролика, находящегося в емкости тороидальной формы, в которую вливается тщательно перемешанное масло или смазочная композиция. Прикладывается нормальная сила – контакт рабочих поверхностей самоустанавливающейся колодки и вращающегося ролика, после чего осуществляется синхронное измерение скорости изнашивания и момента сил трения в течение всего опыта без разъединения зоны трения.

Зона трения (испытательный контакт) образована цилиндрическими поверхностями ролика Ст45 HR_c 50 с R = 35,0 ± 0,1 мм и колодки, прошедшей гомогенизацию с R = 35,0 ± 0,1 мм и габаритами (в плане) – 2,22 мм (вдоль скольжения) и 7,45 мм (поперек скольжения), S = 0,1654 см². Ряд нормальных сил и соответствующих им средних давлений – 31,15; 52,15; 73,15; 94,15; 115,15 кгс и 188,3; 315,3; 442,3; 569,2; 696,2 кгс/см², определен экспериментально, в том числе, из условия гарантированного отсутствия признаков заедания.

Частота вращения вала – 100 об/мин (линейная скорость 0,37 ± 0,01 м/с) выбирается экспериментально, из условия гарантированного отсутствия гидродинамического режима смазки, то есть левее значения частоты вращения ролика, соответствующего M_{тр.min} на экспериментальной зависимости

Штрибека. В отдельных случаях испытания проводились при n = 50 и 150 об/мин, при которых также удовлетворялось условие отсутствия полного разделения трущихся поверхностей сплошной гидродинамической смазочной пленкой.

Температура – установившаяся в конце опыта, синхронно со скоростью изнашивания (V_{изн}) и моментом сил трения (M_{тр}).

Результаты и обсуждение

В результате испытаний получены результаты, в результате которых было обнаружено, что часть экспериментальных зависимостей имеет аномальный характер.

Следует отметить, что в отличие от ТМ5-18 и 2, которые характеризуется тем, что аномальные перемещения колодки синхронизированы с моментом сил трения, достигают больших амплитуд и наблюдаются в течение всего опыта, смазочная композиция 1 ведет себя по-иному. Полученные аномальные отклонения в эксперименте заметно различимы в обеих зависимостях только в начальный момент времени, сразу после смены меньшей нормальной силы на большую. В последующие моменты времени аномальные отклонения на экспериментальных зависимостях скорости изнашивания практически не меняются, в то время как аномалии в поведении момента сил трения очень слабо выражены и визуально не фиксируются (табл. 1,2).

Табл. 1. Скорость изнашивания V_{изн} (мкм/ч)

Нормальные силы, кгс	ТМ5-18	1	2
31,15	40	6	6
52,15	56	51	11
73,15	83	117	27
94,15	186	139	25
115,15	238	170	29

Табл. 2. Момент сил трения M_{тр} (кгс·см)

Нормальные силы, кгс	ТМ5-18	1	2
31,15	14	12	2
52,15	24	26	24
73,15	36	38	34
94,15	46	50	44
115,15	56	64	58

При исследовании трансмиссионное масло ТМ5-18 и смазочных композиций 1 и 2 на его основе были найдены несколько уровней взаимодействия с трущимися поверхностями испытательного контакта (ролика и колодки) и, как следствие, несколько уровней воздействия на измеряемые трибологические характеристики. В процессе эксперимента были получены данные,

указывающие на то, что все исследуемые смазочные композиции при одинаковых условиях эксперимента незначительно отличаются друг от друга значениями момента сил трения и почти не отличаются значениями температуры, установившейся в конце опыта. В одних опытах большим значениям момента сил трения соответствуют большие значения температуры, в других – наоборот.

Иначе вели себя значения скорости изнашивания, периода и амплитуды регулярно возникающих характеров экспериментальных зависимостей $V_{изн}$ и $M_{тр}$. В процессе эксперимента были обнаружены значительные различия. Так, скорости изнашивания $V_{изн}$ при использовании масла ТМ5-18 и смазочной композиции **2** отличаются более, чем в 8 раз. Изменения периода синхронных, регулярно возникающих аномалий характеров экспериментальных зависимостей скоростей изнашивания и моментов сил трения, очевидно, находятся в связи шероховатостью и способностями смазочных материалов воздействовать на качество и время приработки трущихся поверхностей – важному фактору повышения ресурса и эффективности машин и механизмов. Анализ экспериментальных зависимостей скоростей изнашивания и моментов сил трения показывает, что регулярные периодические минимальные значения $M_{тр}$ предшествуют периодическим минимальным уровням каретки и эти периоды равны друг другу.

Из результатов экспериментального исследования следует, что регулярные, синхронные изменения траектории перемещения каретки и момента сил трения находятся в зависимости с величинами частоты вращения ролика (линейной скорости скольжения), нормальной силы и, очевидно, температур. Легирование трансмиссионного масла ТМ5-18 ингибитором Акор-1 (10% масс.) существенно демпфирует колебания $M_{тр}$ по сравнению с чистым ТМ5-18 и наоборот, легирование чистого масла ТМ5-18 ингибитором Телаз_ЛС (10% масс.) увеличивает амплитуду колебаний момента сил трения.

Экспериментальные исследования, проведенные в испытательном узле трения «ролик-колодка» из материалов «сталь-сталь», при описанных выше параметрах испытаний, позволяют сделать вывод, что смазочная композиция **2** во всем диапазоне нормальных сил демонстрирует:

- снижение скорости изнашивания по сравнению с чистым ТМ5-18 в 2-8 раз, а по сравнению со смазочной композицией **1** – в 2-6 раз;

- в большинстве опытов меньшие значения момента сил трения по сравнению с чистым ТМ5-18 и композицией **1**;

- почти одинаковые с другими «участниками» температурами, установившимися в конце опыта;

- несколько меньшие значения периода регулярно возникающих аномалий в характерах экспериментальных зависимостей скоростей изнашивания и моментов сил трения, чем у ТМ5-18, и значительно меньшие, чем у композиции **1**, в то время как амплитуды колебаний существенно больше, особенно по сравнению с композицией **1**, у которой в ряде случаев амплитуды и период визуально не могут быть зафиксированы.

Заключение

Приведенные экспериментальные данные, несмотря на превосходные характеристики, которые приобретает масло ТМ5-18 благодаря легированию его Телаз_ЛС, следует иметь в виду при разработке рекомендаций по применению. Наличие или отсутствие легирующих материалов в масле может улучшать, ухудшать или не оказывать влияния на прирабатываемость трущихся поверхностей. Отдельно следует изучить проблему влияния данных легирующих материалов на задиростойкость, а также на стабильность характеристик износостойкости при испытаниях на ресурс.

[1] Гайдар С.М. Консистентные смазки с наномодифицированным дисульфидом молибдена // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 4. – С. 27-29.

[2] Гайдар С.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГАУ. – 2011.

[3] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Исследование эффективности триботехических препаратов на основе наноматериалов // Грузовик. – 2015. – № 4. – С. 17-29.

[4] Гайдар С.М. Характеристика и показатели наноматериалов для снижения износа деталей сельхозмашин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 12. – С. 20-22.

[5] Гайдар С.М. Применение нанотехнологий для повышения надежности машин и механизмов // Грузовик. – 2010. – № 10. – С. 38-41.

[6] Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Петровская Е.А., Зиятдинов Э.А. Повышение износостойкости узлов трения // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 122. – С. 40-47.

[7] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Технология повышения износостойкости поверхностей трибосоприкосновений физико-химическим методом // Грузовик. – 2015. – № 3. – С. 12-16.

[8] Карелина М.Ю., Гайдар С.М., Пыдрин А.В. Исследование влияния наноструктурирования поверхностей трибосоприкосновений на эксплуатационные характеристики двигателей // Грузовик. – 2015. – № 2. – С. 29-37.

[9] Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю. Адсорбция фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосоприкосновений в условиях граничного и гидродинамического трения // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 118. – С. 113-124.

[10] Гайдар С.М., Свечников В.Н., Усманов А.Ю., Иванов М.И. Использование наноматериалов в качестве присадок к маслам для уменьшения трения в трибосоприкосновениях // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 1. – С. 35-37.

[11] Жерновников Д.Н. Защита стали от атмосферной коррозии летучим ингибитором коррозии ИФХАН-114 // Державинский форум. – 2019. – Т. 3. – № 9. – С. 105-112.
[12] Бекназаров Х.С., Джалилов А.Т., Останов У.Ю., Эркаев А.М. Ингибирование коррозии углеродистой стали олигомерными ингибиторами коррозии в различных средах // Пластические массы. – 2013. – № 8. – С. 36-39.
[13] Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Петровский Д.И., Посулько И.А., Пикина А.М. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии // Коррозия: материалы, защита. – 2021. – № 12. – С. 10-14.

[14] ГОСТ 15171-78. Присадка АКOP-1. Технические условия. Введ. 01.01.1980.
[15] Пыдрин А.В. Повышение коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей применением полифункциональных ингибиторов // Вестник ФГОУ ВПО "МГАУ имени В.П. Горячкина". – 2016. – Т. 74. – № 4. – С. 46-50.
[16] ГОСТ 23216-84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладоновыми смесями. Введ. 01.01.1986.
[17] Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок: Метод. указания / Госстандарт СССР. – 1980. – 59 с.

ИСПЫТАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ КОЛЕБАНИЙ

¹Копейкин А.И., ²Малафеев С.С., ¹Малафеева А.А.*

¹Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия;

²Владимирский политехнический колледж, Владимир, Россия.

*E-mail: amalafeeva@rambler.ru

Механическая подсистема осуществляет силовое взаимодействие электромеханического преобразователя и нагрузки в мехатронной системе и определяет качество и надежность ее работы. Испытания механических компонентов проводятся с целью идентификации характеристик и параметров, определения диссипативных характеристик, оценивания отклонений параметров от расчетных значений, обнаружения неисправностей. Испытания механической подсистемы в режиме колебаний за счет организации движения при переменной скорости в разных направлениях позволяют простыми способами идентифицировать момент инерции колеблющихся масс, характеристику трения, зазоры, диссипативные характеристики и др. Для использования рекуперированной энергии используются способы испытаний с взаимным нагружением приводных электрических машин, накопителями энергии и специальных электрических двигателей в резонансном режиме.

Ключевые слова: мехатроника, колебания, трение, двигатель, управление, обратная связь, измерение.

Введение

Механические компоненты мехатронных систем в большинстве случаев представляют собой сложные технические устройства, которые определяют надежность, эффективность и качество работы всей системы [1-5]. Сопровождение жизненного цикла изделия с использованием цифровых двойников

TESTING OF MECHANICAL COMPONENTS OF MECHATRONIC SYSTEMS IN OSCILLATION MODE

Kopeikin A.I., Malafeev S.S., Malafeeva A.A.

The mechanical subsystem carries out the force interaction of the electromechanical converter and the load in the mechatronic system and determines the quality and reliability of its operation. Tests of mechanical components are carried out in order to identify characteristics and parameters, determine dissipative characteristics, evaluate deviations of parameters from calculated values, and detect malfunctions. Testing of the mechanical subsystem in the oscillation mode due to the organization of motion at variable speed in different directions makes it possible to identify the moment of inertia of oscillating masses, friction characteristics, gaps, dissipative characteristics, etc. in simple ways. To use the recovered energy, test methods are used with mutual loading of drive electric machines, energy storage devices and in resonant mode using special electric machines.

Keywords: mechatronics, vibrations, friction, motor, control, feedback, measurement.

предполагает создание и использование множества моделей различных компонентов [6, 7]. Испытания мехатронных систем выполняются с целью определения их характеристик и уточнения моделей при производстве, после ремонтов и при эксплуатации. Для разных элементов механических компонентов мехатронных систем: редукторов, мультипликаторов,

подшипников, валов и др., обычно используют методы испытаний в статическом режиме под нагрузкой. Для проведения таких испытаний требуется специальное стендовое оборудование и информационно-измерительные системы [8, 9].

Особый интерес представляет технология испытаний механических компонентов в режиме колебаний [10-15]. При периодическом движении проявляются и идентифицируются важные характеристики механической системы: трение, зазоры, упругость и др. Для различных вариантов реализации такой технологии могут использоваться специальные генераторы механических колебаний или собственные электромеханические преобразователи мехатронной системы, работающие в специальном режиме [16, 17].

В работе приведены результаты исследований методики и технического обеспечения испытаний механических компонентов мехатронных систем в режиме колебаний.

Цели и задачи исследования

Анализ и моделирование процессов при испытаниях механических компонентов колебательными методами.

Материалы и методы

Мехатронная система представляет собой конструктивное и функциональное объединение электромеханических, механических, электронных, электропитающих и информационно-управляющих компонентов с высоким уровнем организации процессов управления [18]. Механическая подсистема осуществляет силовое взаимодействие электро-механического преобразователя и нагрузки, включает все механические элементы, начиная от вала двигателя до рабочего органа, а также смазку, и характеризуется множеством нелинейных обратных связей в системе, обусловленных трением, упругими свойствами элементов, и др. [12, 16, 19]. Основные цели испытаний механических компонентов: идентификация характеристик и параметров; определение диссипативных характеристик; оценивание отклонений параметров от расчетных (неидеальностей механической передачи); обнаружение неисправностей [21, 22]. Испытания механической подсистемы в режиме колебаний за счет организации движения при переменной скорости в разных направлениях позволяют простыми способами идентифицировать момент инерции колеблющихся масс, характеристику трения, зазоры, диссипативные характеристики и др. [10-12, 16].

При испытаниях мехатронной системы в режиме колебаний электромеханический преобразователь обеспечивает возвратно-вращательное движение ротора. Энергетическое состояние испытуемого

двигателя и питающей электрической сети при этом характеризуется энергообменными процессами в системе электрическая машина – сеть. При разгоне машины происходит потребление электрической энергии из сети, при торможении машины имеет место рекуперация кинетической энергии вращающихся масс в питающую электрическую сеть. Так как процессы потребления и рекуперации происходят поочередно, то такие испытания характеризуются низкой энергетической эффективностью. При режиме разгона потребляется большая мощность, при рекуперации использование возвращаемой энергии приводит к повышению напряжения в точке подключения нагрузки. Периодический процесс потребления и рекуперации энергии вызывает колебания напряжения в сети и увеличение потерь электрической энергии. Для эффективного использования рекуперированной энергии используются способы испытаний: с взаимным нагружением [8, 17], накопителями энергии [13, 15] и в резонансном режиме с использованием специальных электрических машин [16].

Схема испытаний при взаимном нагружении электрических машин показана на рис. 1.

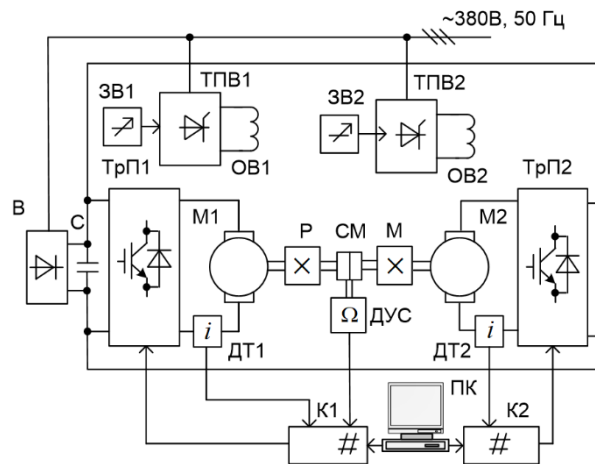


Рис. 1. Функциональная схема испытаний механических компонентов при взаимном нагружении электрических машин

В стенде для испытаний механических компонентов редуктор Р и мультипликатор М присоединены к валам электрических машин М1 и М2 и соединены между собой специальной муфтой СМ. Выпрямитель В формирует на выходе постоянное напряжение, которое фильтруется конденсатором и обеспечивает электропитание двух транзисторных мостовых преобразователей с широтно-импульсным регулированием ТрП1 и ТрП2. Якорные обмотки двигателей постоянного тока М1 и М2 подключены к выходам соответственно первого и второго транзисторных

преобразователей ТрП1 и ТрП2, управление которыми осуществляется контроллерами соответственно К1 и К2. Обмотки возбуждения ОВ1 и ОВ2 двигателей подключены к выходам тиристорных преобразователей ТПВ1 и ТПВ2 с задатчиками ЗВ1 и ЗВ2. Токи в якорных обмотках двигателей М1 и М2 измеряются с помощью первого ДТ1 и второго ДТ2 датчиков тока. Угловая скорость вращающихся валов измеряется датчиком угловой скорости ДУС, механически соединенным с муфтой СМ. Режим испытаний задается с помощью компьютера ПК.

Стенд позволяет проводить испытания двух электрических машин или двух механических передач с различающимися параметрами при взаимном нагружении. При этом напряжение на выходе первого транзисторного мостового преобразователя ТрП1 определяет угловую скорость, а напряжение на выходе второго транзисторного мостового преобразователя ТрП2 – момент нагрузки. Напряжения регулируются независимо, поэтому для проведения испытаний не требуется идентичность параметров электрических машин и механических передач.

Схема испытания механических компонентов в динамическом режиме с накопителем энергии приведена на рис. 2 [13]. Установка содержит трансформатор, подключенный к питающей электрической сети, и управляемый выпрямитель В, подключенный к вторичной обмотке трансформатора. Звено постоянного тока содержит накопитель энергии (суперконденсатор С) и дроссель L, выполняющий функцию фильтра высших гармоник. Реверсивный транзисторный преобразователь энергии ТП обеспечивает формирование питающего напряжения для двигателя М. Управление преобразователем энергии осуществляется с помощью контроллера. Вал двигателя через механическую передачу МП соединен с маховиком.

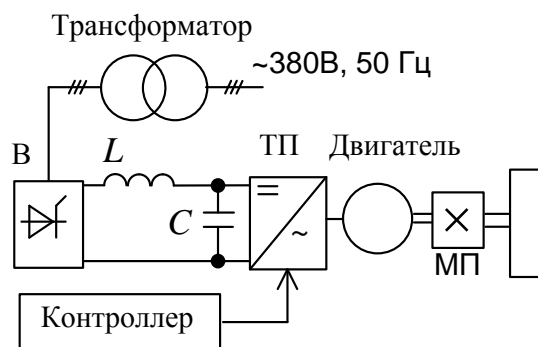


Рис. 2. Упрощенная схема испытаний в динамическом режиме

Испытание электрического двигателя в динамическом режиме происходит следующим образом. Суперконденсатор С, подключенный к выходу управляемого выпрямителя через дроссель, функционирует в режиме подзаряда [13]. На нем с помощью управляемого выпрямителя поддерживается постоянное напряжение. Контроллер формирует знакопеременное напряжение управления для реверсивного преобразователя энергии. Реверсивный транзисторный преобразователь энергии формирует напряжение питания двигателя М, обеспечивающее его возвратно-вращательное движение за счет энергии, накопленной в суперконденсаторе. При вращении двигателя в одном направлении, т.е. при разгоне до максимальной скорости Ω_m , в маховике и роторе двигателя накапливается кинетическая энергия

$$W_c = \frac{J\Omega_m^2}{2},$$

где J – суммарный момент инерции маховика, механической передачи и ротора двигателя.

При изменении направления вращения двигателя происходит торможение вращающихся масс и преобразование механической энергии в электрическую энергию, которая возвращается в суперконденсатор. Далее цикл повторяется. Нагрузка двигателя регулируется частотой и амплитудой колебаний.

Потери энергии в элементах реверсивного преобразователя и двигателе компенсируются за счет подзаряда суперконденсатора от питающей сети. Таким образом, потребление энергии из питающей сети при испытаниях электрической машины определяется потерями в элементах системы и составляет 5...15% от мощности испытуемой электрической машины.

Рассмотренный способ обеспечивает повышение энергетической эффективности испытаний механических передач за счет использования рекуперированной энергии при торможении вращающихся масс непосредственно для последующего разгона машины с маховиком.

Схема реализации способа испытаний механических компонентов с использованием специальной электромеханической управляемой колебательной системы показана на рис. 3 [16]. В схеме используется электрическая машина переменного тока М с активным ротором, например, синхронный двигатель с постоянными магнитами. Система управления содержит контроллер, который формирует сигналы управления для усилителя 1 постоянного тока и усилителя 2 переменного тока,

датчик угловой скорости ДУС и датчики напряжения и тока. Одна из обмоток (А) статора электрической машины М, подключена к выходу усилителя постоянного тока. Две другие обмотки В и С трехфазной машины, соединенные последовательно, подключены к выходу усилителя переменного тока. При таком включении обмоток в зазоре статор – ротор возникает качающееся магнитное поле. Взаимодействие качающегося и постоянного полей приводит к образованию знакопеременного момента, вызывающего колебательное движение ротора. При этом параметры электрических и механических колебаний являются функциями характеристик механической части системы: момента инерции, характеристик трения, жесткости [16].

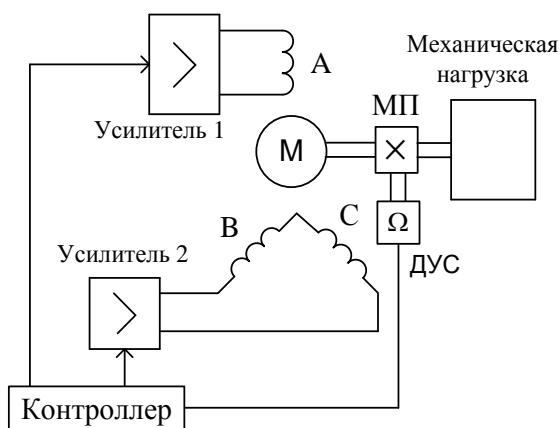


Рис.3. Упрощенная схема управляемой электромеханической колебательной системы

Обмотка статора, подключенная к выходу усилителя постоянного тока, выполняет функцию «электрической пружины», устанавливающей активный ротор в начальное положение при отсутствии переменного тока в другой обмотке статора. Регулирование жесткости электрической пружины позволяет управлять параметрами колебаний, в том числе находить и поддерживать резонансный режим.

Заключение

Рассмотренные способы испытания механических компонентов мехатронных систем обеспечивают повышенную энергетическую эффективность проведения длительных экспериментов. При этом силовая часть установок имеет простую конструкцию. Изменение нагрузки производится регулированием параметров колебаний. Измерение и обработка параметров колебательного режима позволяет получить дополнительную информацию о потерях в двигателе при работе в динамическом режиме, в том числе, при рекуперации энергии.

Методики применены при разработке установок и стендов для испытания подшипников и редукторов, в том числе, горных машин.

Целью дальнейших исследований является модификация рассмотренных способов для испытаний механических передач, работающих в циклическом режиме, путем имитации реальной нагрузки, и идентификации характеристики трения.

- [1] Альгин В.Б., Поддубко С.Н. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин. – Минск, Беларуская наука, 2019. – 549 с.
- [2] Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. Справочник, М., Машиностроение, 1984. – 280 с.
- [3] Holmberg K. et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry // Tribology International. – 2017. – Т. 115. – С. 116-139.
- [4] Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment. Logistics Technology Support. Naval Surface Warfare Center. Carderock Division, West Bethesda, 2010. – 505 p.
- [5] Embedded Mechatronic Systems. Volume 2: Analysis of Failures, Modeling, Simulation and Optimization. Edited by A. El Hami, and P. Pougnet. ISTE Press Ltd, 2020. – 280 p.
- [6] Малафеева А.А., Малафеев С.С. Контроль состояния и ресурса компонентов мехатронных систем с помощью цифровых двойников // Научные труды VII Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: ИМАШ РАН. – 2021. – С. 155-157.
- [7] Jones D. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 9.03.2020, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- [8] Патент РФ № 2777694. МПК G01R31/34. Стенд для испытания электрических машин постоянного тока / С.И. Малафеев. – Опубл. 08.08.2022. Бюл. № 22.
- [9] Kopylova L. G. et al. Development and practical application of a multifunctional test bench for experimental research of precise mechatronic systems //Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Т. 9. – №. 46. – С. 107506.
- [10] Dağdelen M., SARIGEÇİLİ M. An Experimental Method for Estimating Combined Friction Torque in Vane Type Pneumatic Semi Rotary Actuators //Sakarya University Journal of Science. – 2020. – Т. 24. – №. 6. – С. 1272-1283.
- [11] Merzouki R. et al. Backlash fault detection in mechatronic system //Mechatronics. – 2007. – Т. 17. – №. 6. – С. 299-310.
- [12] Malafeev S.I., Kopeykin A. I., Malafeev S. S. Investigation of the characteristics of friction pairs in the oscillation regime: the method and implementation of the mechatronic oscillatory system //Proceedings of BALTTTRIB. – 2017. – С. 137-142.
- [13] Malafeev S.I., Malafeev S.S. Dynamic loading of electric machines during testing //International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Т. 7. – №. 2.23. – С. 184-187.
- [14] Boldea I, Tutelea L., and Klumpner C. Artificial loading of induction machines: a review, Workshop on Electrical Machine's Parameters. Technical University of Cluj-Napoca, 26th of May, 2001, – С. 9-14.
- [15] Патент РФ № 2561230. МПК G01R31/34. Стенд для испытания электрических машин в динамическом режиме / С.И. Малафеев. Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.
- [16] Копейкин А.И., Малафеев С.И. Управляемые электромеханические колебательные системы. – Владимир, Посад, 2001. – 128 с.
- [17] Malafeev S. I., Novgorodov A. A., Konyashin V. I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives //2020 XI International

Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – IEEE, 2020. – С. 1-5.

[18] Исии Т., Симояма И., Иноуэ Х., Хиросэ М., Накадзима Н. Мехатроника / Пер. с япон. – М., Мир, 1988. – 314 с.

[19] Комлев В.П., Евстигнеева А.А., Малафеев С.И. Исследование модели электропривода постоянного тока с нагрузкой типа сухое трение // Известия вузов СССР. Приборостроение. – 1983. – №7. – С. 33-36.

[20] Armstrong-Helouvry B. Control of Machines with Friction. Boston, MA, Kluwer, 1991. – 173 p.

[21] Gerike P.B., Klishin V.I. Vibration analysis of electromechanical equipment of mining shovels //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – Т. 262. – №. 1. – С. 012020.

[22] Zschippang H. A., Weikert S., Wegener K. Face-gear drive: Meshing efficiency assessment //Mechanism and Machine Theory. – 2022. – Т. 171. – С. 104765.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛАСТОМЕРОВ ПРИ КОНТАКТНО-ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Копченков В.Г.

E-mail: kopchenkov2@rambler.ru

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия.

Анализ исследований механизмов разрушения полимеров и эластомеров дал возможность сформулировать структурную модель разрушения эластомеров, которая объясняет износ эластомеров единичными актами разрушения при накоплении избыточной энергии в отдельных молекулярных цепях как результат неравномерности ее распределения в поверхностном слое. Разработана математическая модель изнашивания, которая опирается на введённое понятие плотности поглощенной энергии приходящейся на единицу объема разрушения эластомера, находящегося в потоке твердых абразивных частиц. Базовое уравнение дает возможность для анализа и прогнозирования требований к физико-механическим свойствам эластомеров в условиях контактно-динамического нагружения.

Ключевые слова: Разрушение эластомеров, структурная модель разрушения, математическая модель изнашивания, энергетическая теория изнашивания.

Введение

Обеспечение высокой износостойкости деталей является обязательным условием надёжной работы машин и механизмов, поскольку вследствие износа происходит потеря работоспособности 80-90% машин. Это обуславливает необходимость и актуальность изучения явления, его закономерностей и на этой базе разработку методов его снижения. В определённых условиях

FORECASTING OF WEAR RESISTANCE OF ELASTOMERS UNDER CONTACT-DYNAMIC LOADING

Kopchenkov V.G.

An analysis of studies of the mechanisms of destruction of polymers and elastomers made it possible to formulate a structural model of the destruction of elastomers, which explains the wear of elastomers by single destruction events during the accumulation of excess energy in individual molecular chains as a result of its uneven distribution in the surface layer. A mathematical model of wear has been developed, which is based on the introduced concept of the density of absorbed energy per unit volume of destruction of an elastomer in a flow of solid abrasive particles. The basic equation makes it possible to analyze and predict the requirements for the physical and mechanical properties of elastomers under conditions of contact-dynamic loading.

Keywords: Destruction of elastomers, structural model of destruction, mathematical model of wear, energy theory of wear.

эксплуатации наиболее эффективным оказался метод гуммирования — футерование резиной деталей машин, подвергающихся ударному воздействию твёрдых частиц [1,2]. Изучение механизма разрушения резин при контактно-динамическом нагружении даст основу для дальнейшего повышения износостойкости резиновых футеровок

Постановка задачи

Разрушение резины и происходящие при этом процессы являются основой для понимания и описания процессов, происходящих при изнашивании. Изнашивание можно рассматривать как суммарный результат единичных актов разрушения. Разрушение вязкоупругих материалов является весьма сложным процессом и в настоящее время не существует общепринятой теории разрушения. Поэтому возникает необходимость рассмотрения физических основ, обуславливающих прочность и разрушение резины и износ.

Цель работы

Создание теоретической структурной, а на ее основе математической модели, позволяющей использовать инженерный подход к прогнозированию интенсивности изнашивания эластомеров и их срока службы.

Разработка гипотезы разрушения

Проведён анализ теорий разрушения полимеров [3,4,5,6]. Для случая эластичных вязкоупругих материалов [7,8]. А также изменения, происходящие в структурно-детерминированных объемах эластомера под внешним воздействием позволяют сформулировать процесс разрушения резин на мезоуровне и предложить структурную модель разрушения эластомера, лежащую в основе математической модели изнашивания.

Любая деформация, возникающая в резине при энергетическом воздействии, распределяется посредством постоянных и временных поперечных связей и, как правило, неравномерно. Когда сетка растягивается, то совершается работа, которая частично накапливается как внутренняя энергия или уменьшение энтропии, что благоприятствует образованию и развитию трещины. Другая часть работы рассеивается вследствие межмолекулярного трения при относительном смещении и конформации макромолекул, а так же доменов. Этот процесс является основной причиной нагрева каучуков при циклическом деформировании.

Мезообъемы воспринимающие деформации неоднородны. Не все элементы представляют собой подвижные сегменты одинаковой длины и ориентации. Поэтому некоторые из них оказываются более растянуты и движутся быстрее, чем соседние. В результате, даже однородная макродеформация приводит к неравным локальным деформациям и движениям. Вследствие неаффинной деформации происходит разрушение нескольких цепей, а при увеличении деформации и всей пряди. Цепи дополнительно ослабляются термохимическими и термофлуктуационными

процессами. Результатом является возникновение в объеме разрушения большого количества субмикротрещин, а также пластическое течение материала.

Дальнейшее разрушение резины идет за счет развития или, можно сказать, раздира трещины. В области вершины трещины, цепи вытягиваются до истощения конформационного ресурса и втягивают в движение близлежащие макромолекулы и домены. Этот процесс ведет к диссипации энергии подводимой к трещине. Баланс нарастания энергии в вершине и ее диссипации определяет критическую нагрузку и скорость разрушения резины.

Ветвление трещины, образование малых трещин, течение и распад доменов, образование небольших полостей около частиц наполнителя способствует дополнительной диссипации энергии и повышению критической плотности энергии. Трещина, которая начинает расти в матрице каучука, должна пересечь на своем пути большое количество различных по своей природе доменов. Частицы наполнителя, уменьшают объем возможного развития трещины и затупляют ее образованием трехосного напряженного состояния или полостей. В результате развитие трещины может остановиться, а в рост пойдет другая у которой будут более благоприятные условия для развития. Следствием является возникновение и рост нескольких трещин и уменьшения скорости разрушения.

Модель разрушения резин позволяет выделить факторы, определяющие возникновение и скорость развития разрушения. В первую очередь к ним относятся структура молекулярной сетки, т.е. вид каучука, степень наполнения техническим углеродом, сшитость макромолекул поли- и моносульфидными связями а также развитость надмолекулярной структуры. Отсюда вытекает уровень кристалличности и, следовательно, упрочнения отдельных областей, неаффинность деформации, величина потерь энергии при конформации на межмолекулярное трение. Они определяют рост температуры и термофлуктуационной напряженности молекулярных связей.

Скорость развития трещины является следствием нескольких конкурирующих процессов. С одной стороны высокий уровень диссипации замедляет рост трещины. С другой стороны диссипация через увеличение внутренней энергии и температуры способствует снижению энергии разрыва межмолекулярных химических и физических связей и ускорению роста трещины.

Разработка математической модели.

Создание структурной модели разрушения позволяет предложить подход к математическому моделированию разрушения резины на мезоуровне.

Разрушение резины связано в первую очередь с уровнем диссипации подводимой энергии. Основной вывод вытекающий из рассмотренной структурной модели разрушения определяет, что разрушение и как следствие износ является следствием подвода энергии к материалу через внешнее механическое взаимодействие объектов [1,9]. Поэтому интенсивность изнашивания пропорциональна величине подводимой энергии.

$$J_w = K \cdot W_0, \quad (1)$$

где J_w – энергетическая интенсивность изнашивания, K – коэффициент пропорциональности, W_0 – кинетическая энергия внешнего воздействия.

Ранее[1] был сделан вывод о том, что необходимо учитывать только поглощенную энергию, вызывающую повреждение эластомера в некотором объеме V , на который распространяется действие энергии при ударе.

$$J_w = K \frac{P \cdot W_0}{V} = K \cdot P \cdot w, \quad (2)$$

где w – плотность подводимой энергии, P – параметр повреждаемости поверхности при ударе частицы. Он показывает, какая доля энергии в процессе ее преобразования при ударе пошла на разрушение внутренней структуры материала, и насколько эффективно используется эта энергия с учетом физических и химических процессов активируемых механическим нагружением.

$$P = \chi \cdot k_p \cdot k_x, \quad (3)$$

где χ – коэффициент механических потерь [10], k_p – коэффициент эффективности действия энергии при ударе, k_x – коэффициент, учитывающий изменение усталостно-прочностных свойств под воздействием немеханических факторов

По смыслу зависимости (1), исходя из определения энергетической интенсивности изнашивания, коэффициент пропорциональности представляет собой удельную энергетическую интенсивность изнашивания. Размерность коэффициента пропорциональности подтверждает это.

$$J_w = i_w \cdot P \cdot W \quad (4)$$

Удельная энергетическая интенсивность изнашивания это отношение изнашиваемого объема к работе разрушения

$$i_w = \frac{V_R}{A_R} = \frac{1}{w_R}, \quad (5)$$

где V_R – объем частицы износа, A_R – работа отделения частицы износа, w_R – критическая плотность энергии разрушения.

С учетом приведенных выражений базовые уравнение можно записать в следующем виде

$$J_w = P \frac{w}{w_R}, \quad (6)$$

где w – плотность подводимой энергии, w_R – критическая плотность энергии, P – параметр повреждаемости.

Из уравнений следует, что энергетическая интенсивность изнашивания показывает, во сколько раз критическая плотность энергии превышает фактическую плотность поглощенной энергии, устанавливающуюся в реализуемых условиях изнашивания.

Критическую плотность энергии можно рассматривать как критерий изнашивания

$$w_R = \frac{A_R}{V_R}. \quad (7)$$

Она показывает, какова энергия связей, которые необходимо разорвать, для отделения фрагмента разрушения. По физическому смыслу соотношение (7) близко к критерию изнашивания – удельной работе износа как отношению диссипативной работы трения к интенсивности изнашивания, который в разных редакциях предлагался В.Д. Кузнецовым, П.А. Ребиндером, Б.И. Костецким, Н.Н. Давиденковым, В.И. Дырдой.

В соответствии с результатами исследования изнашивания [10] частицу износа можно аппроксимировать призмой с треугольным основанием объем которой

$$V_R = l_T \cdot h_R \cdot b. \quad (8)$$

где l_T – длина трещины, h_R – глубина трещины, b – характеристический размер частицы.

Работа затраченная на отделение фрагмента материала рассчитывается с использованием характеристической энергии раздира H , которая представляет собой энергию необходимую для образования единицы свободной поверхности при раздирании. Поэтому

$$A_R = H \cdot l_T \cdot b. \quad (9)$$

Подставив (8) и (9) в (7) получим, что критическая плотность энергии

$$w_R = \frac{H}{h_R}. \quad (10)$$

Она показывает величину характеристической энергии раздира затрачиваемой на образование единицы глубины трещины.

Характеристическая энергия раздира связана с удельной энергией разрыва. Согласно [11]

$$H = k \cdot d_0 \cdot W_p, \quad (11)$$

где d_0 – эффективный диаметр вершины трещины или надреза, W_p – удельная энергия разрыва, k – коэффициент, учитывающий снижение прочности резины за счет наличия структурной неоднородности. Его величина по данным, приводимым в [11] обычно принимается близкой к двум. Поэтому выражение (10) можно записать в виде

$$w_R = \frac{2d_0 W_p}{h_R}. \quad (12)$$

С учетом приведенных выражений базовое уравнение изнашивания

$$J_w = \frac{\chi \cdot k_p \cdot k_x \cdot W_0}{w_R}. \quad (13)$$

В такой его записи, после расчета входящих коэффициентов, можно использовать, если плотность поглощенной энергии определяется из эксперимента.

Если базовое уравнение необходимо для анализа и прогнозирования требований к физико-механическим свойствам резины то

$$J_w = \frac{\chi \cdot k_p \cdot k_x \cdot h_R \cdot W_0}{2d_0 \cdot w_R}. \quad (14)$$

Результаты

Предложена математическая модель для определения интенсивности изнашивания на основе энергетической теории. Из модели следует, что интенсивность изнашивания возрастает при увеличении: механических потерь в резине, вероятности разрыва молекулярных цепей, химической активности резины, глубины развития трещины и кинетической энергии частицы и при уменьшении энергии разрыва и радиуса вершины трещины.

Можно отметить и физический смысл энергетической интенсивности изнашивания, показывающий во сколько раз критическая плотность энергии разрушения превышает фактическую плотность поглощенной энергии для конкретных условий эксплуатации.

- [1] Гуммированные детали машин /Пенкин Н.С. Копченков В.Г. Сербин В.М и др. – М.: Машиностроение, 2013. – 245 с.
- [2] Anderson K., Karimi S., Shirazi S. Erosion testing and modeling of several non-metallic materials. // Wear. – 2021. – V. 477. – pp. 203811.
- [3] Тугов И.И., Кострыкина Г.И. Химия и физика полимеров. – М.: Химия, 2009. – 432с.
- [4] Кауш Г. Разрушение полимеров: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 440 с.
- [5] Бартнев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров. – М.: Высшая школа, 2003. – 390 с.
- [6] Бартнев Г.М., Бартнева А.Г. Релаксационные свойства полимеров. – М.: Химия, 1992. – 384 с
- [7] Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров.– М.: Высшая школа, 1966. – 312 с.
- [8] Бухина М.Ф. Техническая физика эластомеров. М.: Химия, 2004. – 224с
- [9] Федоров С.В. Структурно-энергетическая интерпретация трибосистемы// Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 2. – С.186-190.
- [10] Копченков В.Г. Определение коэффициента механических потерь при косом ударе/Каучук и резина. – 2000. №3. – С.18-20.
- [11] Резниковский М.М., Лукомская А.И. Механические испытания каучука и резины. – М.: Химия, 1964, – 528 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛАХ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

¹Корнеев С.В., ²Большаков Р.С.*

*E-mail: Bolshakov_rs@mail.ru

¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия;

²Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия.

Рассматривается современное состояние разработок в области определения нагрузок в подшипниковых узлах технических объектов при вибрационных воздействиях. Проведен анализ способов и средств, используемых при проведении оценки динамического состояния технологических машин различного назначения. Показана общность подходов, основанных на применении механических колебательных систем с конечным числом степеней свободы. На основании проведённого обзора определены направления для развития методов расчёта параметров динамического состояния технологического оборудования при вибрационных возмущениях. Предлагаемые подходы основаны на использовании структурных схем систем автоматического управления, эквивалентных в динамическом отношении исходных расчётным схемам технических объектов.

Ключевые слова: виброзащита и виброизоляция, технологическое оборудование, динамическое состояние, математическое моделирование, структурные схемы, внешние возмущения, передаточные функции.

Введение

Создание современных машин связано с вопросами устойчивой эксплуатации составляющих их узлов и агрегатов, решение которых производится на стадии проектирования новых или модернизации существующих технических объектов. К ним можно отнести проблемы трибологии, прочности, изготовления деталей и др. [1-2].

В частности, можно отметить, что функционирование промышленных предприятий связано с возникновением вибраций различной интенсивности, негативно влияющие на работоспособность используемого технологического оборудования. В нынешних условиях роста промышленных производств учет вибрационных процессов является актуальным. В связи с этим возникает необходимость поиска и разработки способов и средств обеспечения надежности и безопасности эксплуатации узлов и агрегатов технологических машин и механизмов.

LOADS IDENTIFICATION IN BEARING ASSEMBLY AT VIBRATION DISTURBANCES

Korneev S.V., Bolshakov R.S.

The current state of developments in the field of determining loads in bearing assemblies of technical objects under vibrational influences is considered. The analysis of the methods and means used in the evaluation of the dynamic condition of technological machines for various purposes is carried out. The generality of approaches based on the use of mechanical oscillatory systems with a finite number of degrees of freedom is shown. Based on the review, directions for the development of methods for calculating the parameters of the dynamic state of technological equipment under vibration disturbances were determined. The proposed approaches are based on the use of structural diagrams of automatic control systems that are dynamically equivalent to the original design diagrams of technical objects.

Keywords: vibration protection and vibration isolation, technological equipment, dynamic state, mathematical modeling, block diagrams, external disturbances, transfer functions.

Интенсивное динамическое нагружение оборудования, приборов и аппаратуры характерно для предприятий горнодобывающей, химической промышленности, железнодорожного транспорта, строительства, высокотехнологичных производств и т.д. Исследованиям, посвящённым оценке и контролю вибрационных процессов, посвящен ряд работ отечественных учёных [4-6]. В частности, можно отметить научные исследования, связанные с вибрационным перемещением сыпучих смесей, классификацией деталей, упрочнением деталей сложной геометрической формы, нагрузок в подшипниковых узлах и др. [7-11]. Для учёта динамических особенностей рассматриваемых технических объектов необходимо формирование их расчётных схем, в качестве которых чаще всего используется механические колебательные системы. Для проведения детализированной оценки свойств технологического оборудования необходимо составление математических моделей, к которым

могут быть отнесены структурные схемы автоматического управления, представляющие собой динамические аналоги исходных расчетных схем [12].

При всей разработанности научных направлений, связанных с учетом, контролем и управлением вибрационными машинами и определением нагрузок на подшипниковые узлы, остаются вопросы, связанные с оценкой дополнительных параметров их динамического состояния [13], к которым можно отнести динамические реакции, рычажные связи и взаимодействие межпарциальных систем.

В предлагаемом докладе рассматривается современное состояние разработок в области вибрационных нагрузок в подшипниковых узлах.

Материалы и методы

Представление технических объектов, к примеру, транспортной динамики, достаточно сложно. Их разнообразные динамические свойства отражаются расчетными схемами различной сложности и соответствующими математическими моделями (рис. 1), при малых колебаниях и статическом равновесии системы. Приведенные схемы используются для выделения объекта защиты, системы основных составных элементов от внешних воздействий и для составления математических моделей виброзащитных систем. Математические модели, в виде системы дифференциальных уравнений, составляются на формализованной основе; используется принцип Даламбера или уравнения Лагранжа [12]. Поскольку технические объекты часто бывают сложными, то и набор рассматриваемых движений также достаточно обширен и разнообразен, поэтому можно говорить о существовании определенного иерархированного класса моделей, отражающих различные свойства колебательных движений.

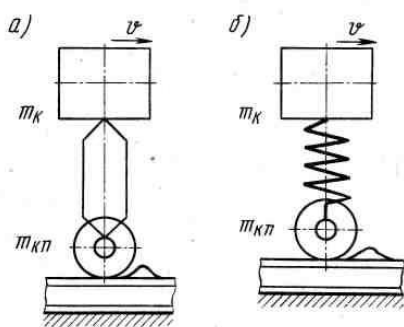


Рис. 1. Расчетные схемы в задачах транспортной динамики

Анализ расчетных схем объектов динамических взаимодействий, если иметь в виду, транспортные средства, приводит, в конечном итоге,

к представлениям о том, что в структуре механических колебательных систем существенное значение приобретают рычажные связи и механизмы. Внимание к вопросам подобного рода стало заметно проявляться в последнее десятилетие в связи с разработкой теоретических аспектов динамических взаимодействий рычажных механизмов в структурах механических колебательных систем [12, 13].

Концепция структурных представлений основана на дальнейшем развитии подходов, получивших детализированную технологию преобразований исходных схем и определения откликов системы на типовые внешние воздействия, нашли отражение в [12]. На рис. 2, а и б, представлены детализированная расчетная схема (рис. 2, а) и структурная схема, которая дает представление об алгоритмической основе структурного подхода, основная идея которого заключается в использовании возможностей структурных преобразований исходных схем с выделением необходимых точек для входных и выходных «сигналов». В таком случае возникает возможность ставить вопрос о формировании так называемой «динамической связи».

Структурная схема системы автоматического управления может быть преобразована относительно массоинерционного элемента, сформированная обратная связь в этом случае будет представлять собой приведенную жесткость (рис. 3).

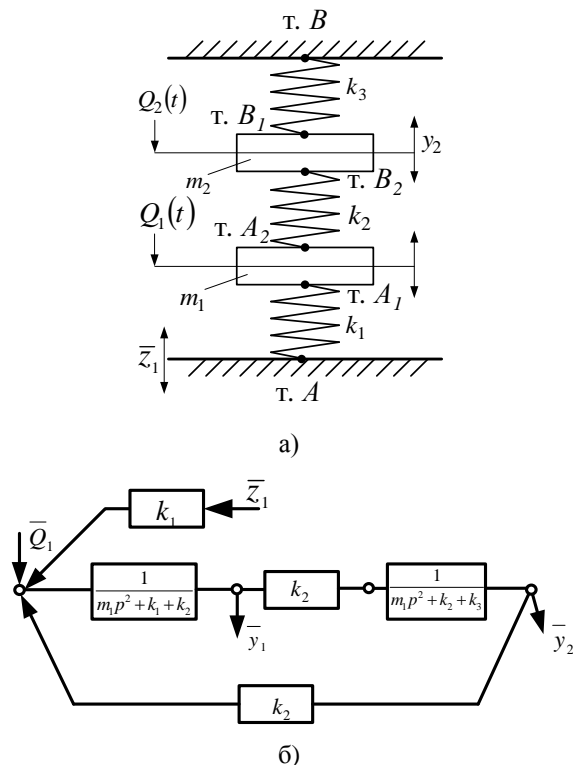


Рис. 2. Расчетная и структурная схемы в задачах транспортной динамики

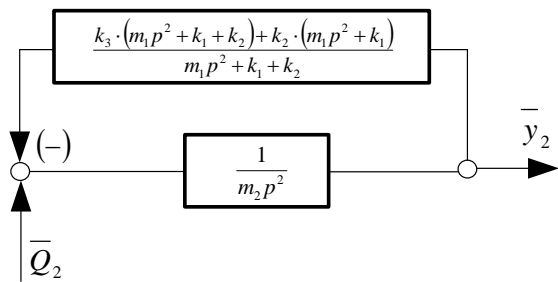


Рис. 3. Детализированная структурная схема

Типовые расчетная (рис. 4, а) и структурная (рис. 4, б) схемы вибрационной технологической машины представлена на рис. 4.

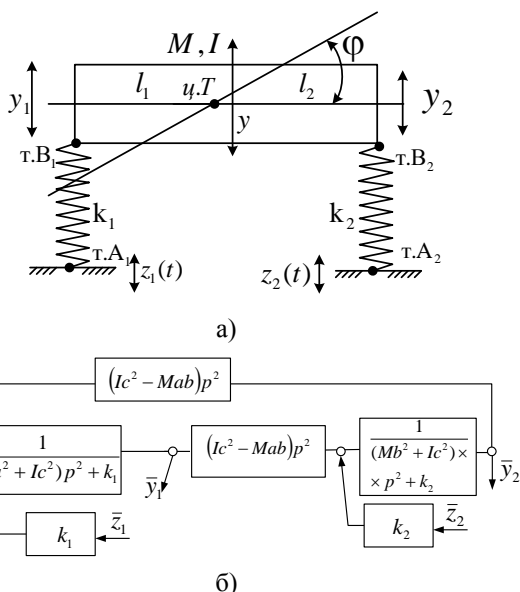


Рис. 4. Расчетная (а) и структурная (б) схемы вибрационной технологической машины

Представленные структурные схемы показывают наличие динамических связей между элементами системы и позволяют построить передаточные функции, представляющие собой отношение смещения к входящему внешнему возмущению. Полученные выражения показывают наличие в системах частот собственных колебаний и частот динамического гашения, что соответствует традиционным подходам. В связи с этим более детально следует обратить внимание на подходы, направленные на учёт усилий в подшипниковых узлах, в том числе на оценку динамических реакций в точках крепления элементов между собой и к массоинерционным элементам, а также на межпарциальные связи между координатами смещения крайних точек твердого тела.

Результаты и обсуждение

Динамическая реакция представляет собой произведение смещения и жесткости. Необходимые соотношения приведены в [13]. В рассматриваемом

случае для системы с двумя степенями свободы (рис. 2, а) необходимо определить жесткость обобщенной пружины при действии эквивалентного силового возмущения, что даёт нетрадиционный вид передаточной функции. Полученное выражение примет вид:

$$W_1(p) = \frac{\bar{R}_{B2}}{\bar{Q}_{\text{ЭКВ}}} = \frac{k_2(m_1 p^2 + k_1) \times \dots \times (k_2 + (m_1 p^2 + k_1 + k_2) \alpha)}{\{(m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2\}}. \quad (1)$$

При постановке задачи по оценке динамического состояния технического объекта, представляющего собой вибрационную технологическую машину (рис. 4, а и б), имеет значение выбор системы координат. В данном контексте в качестве системы координат выбирается y_1, y_2 , то есть крайние точки рабочего органа технического объекта, расчетная схема которого представляет собой механическую колебательную систему с твердым телом на упругих опорах (рис. 4, а). Аналогичные преобразования исходной системы дифференциальных уравнений с применением изображений Лапласа позволяют получить структурную схему (4, б), при помощи которой могут быть найдены приведенная жесткость и смещения по координатам движения системы, к примеру, в т. B_2

$$W_2(p) = \frac{\bar{R}_{B2}}{\bar{Q}_{\text{ЭКВ}}} = \frac{\{k_2[(Ma^2 + Ic^2)p^2 + k_1] - (Ic^2 - Mab)^2 p^4\} \times \dots \times [(Ma^2 + Ic^2)p^2 + k_1] \times \dots \times (Ic^2 - Mab)p^2}{\times [(Mb^2 + Ic^2)p^2 + k_2] - [(Ic^2 - Mab)p^2]^2}. \quad (2)$$

Соотношение реакций связей в точках крепления упругих элементов к твердому телу также позволяет рассматривать реакции связей как параметр оценки динамического состояния вибрационной технологической машины с возможностью его регулирования при помощи изменения значений различных характеристик системы.

Также имеет значение учет связности координат движения, показывающий различные варианты соотношений между y_1 и y_2 и позволяющие получать различные динамические режимы движения вибрационной машины. Передаточная функция межпарциальных связей представлена выражением (3):

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(Ic^2 - Mab)p^2}{k_1 \bar{z}_1 [(Mb^2 + Ic^2)p^2 + k_2]} \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет оценивать распределение амплитуд колебаний по всей длине рабочего органа вибрационной технологической машины, что даёт возможность для более детализированного определения усилий в подшипниковых узлах.

Заключение

Анализ литературных источников показывает глубокую проработку научных проблем в смежных областях, в том числе связанных вопросами трения и износа в узлах и агрегатах технологических машин, определением прочности деталей различной геометрической формы, учетом вибрационных процессов, возникающих при интенсивной эксплуатации приборов и аппаратуры. Однако некоторые аспекты вибрационных процессов, в том числе связанные с определением усилий в подшипниковых узлах, остаются не до конца разработанными.

Существующие методологические аспекты, предназначенные для оценки динамических свойств технических объектов, известны и традиционно используются при решении задач, связанных с учетом наличия в системе частот собственных колебаний и динамического гашения. При этом возможно расширение методологии расчета параметров динамического состояния виброзащитных систем за счет использования динамических реакций и межпарциальных связей.

Предлагается применение передаточных функций, показывающих изменений динамической реакции в зависимости от внешнего возмущения. Такой подход применим как для оценки динамического состояния цепных механических колебательных систем, так и для систем с твердым телом на упругих опорах, характерных для вибрационных технологических машин. Также следует отметить передаточную функцию межпарциальной связи как способ, позволяющий определять соотношение между координатами движения элементов технических объектов. Такой подход позволяет контролировать изменений динамических реакций связей по координатам движения крайних точек рабочего органа для выбора оптимального режима работы, что позволяет избежать многих нежелательных эффектов, возникающих в процессе работы технологического оборудования.

Таким образом, направление исследований, связанных с поиском и разработкой способов и средств, направленных на формирование детализированной оценки динамического состояния вибрационной защиты технологического оборудования.

- [1] Доценко А.И., Буяновский И.А. Триботехника: Учебник – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2020. – 399 с. DOI 10.12737/1016651.
- [2] Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Новосибирское отделение издательства "Наука", 2008. – 528 с.
- [3] Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров. – Омск: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2013. – 240 с.
- [4] Ганиев Р.Ф., Кононенко В.О. Колебания твердых тел. – М.: Наука. Физматгиз, 1976 г. – 432 с.
- [5] Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов: монография. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. – 176 с.
- [6] Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. – М.: Машиностроение, 1985. – 286 с.
- [7] Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии; Фед. аг. по обр., гос. обр. учреждение высш. проф. образования Донской гос. технической ун-т. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2008. – 693 с.
- [8] Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
- [9] Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография – Воронеж: Науч. книга, 2011. – 569 с.
- [10] Корнеев С.В., Ярмович Я.В., Буравкин Р.В. Совершенствование эксплуатации дробильно-размольного оборудования //Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – №. 7. – С. 922-931. DOI 10.17516/1999-494X-2017-10-7-922-931.
- [11] Галахов М.А., Бурмистров А.Н. Расчет подшипниковых узлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с
- [12] Елисеев С.В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных и технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи): монография – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – 692 с.
- [13] Большаков Р.С. Особенности вибрационных состояний транспортных и технологических машин. Динамические реакции и формы взаимодействия элементов. – Новосибирск: Новосибирский филиал Федерального государственного унитарного предприятия "Академический научно-издательский и книгораспространительский центр "Наука", 2020. – 411 с.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛАСТОМЕРОВ

Королев П.В., Шилов М.А.

E-mail: vedunking@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет, Иваново, Россия.

В работе представлены результаты по определению влияния пространственной организации, концентрации и ориентации углеродных наноструктур (УНС) на триботехнические и физико-механические характеристики эластомеров на основе каучуков СКИ-3. Показано, что лучшими характеристиками обладают резины с многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ) в концентрации 0,5 мас. % с ориентацией перпендикулярной воздействию. **Ключевые слова:** углеродные наноструктуры, твердость, адгезия, износостойкость.

Введение

Полимерные нанокomпозиционные материалы (ПНКМ) относятся к классу многофазных систем, таких как пены, композиты и т.д., и могут быть определены как «комбинация полимерной матрицы и добавок, которые имеют по меньшей мере один размер в нанометровом диапазоне» [1]. Добавки могут быть в 0D, 1D, 2D или 3D формах, таких как углеродные нанотрубки (УНТ), окисленный графен (GO), или слоистые листы глинистых минералов и различные сферические частицы (нульмерные). ПНКМ всегда состоят из двух или более компонентов, и, как правило, компонент, используемый в небольших количествах, называется наполнителем, а элементы, которые относительно в большем количестве, называются матрицей. Поэтому смешивание наполнителя и матрицы в определенных количествах дает гибридный материал, полностью или частично отличающийся от исходных компонентов [2]. Если быть точнее, ПНКМ является новым гибридным материалом, в составе которого компонент или структура нанометрового масштаба (до 200 нм) порождает множество новых физических и химических свойства, отсутствующих в исходных компонентах. В тоже время, используя УНТ в составе резиновых смесей, возможно, достичь разных структурных эффектов [1-2].

STUDY OF INFLUENCE OF CARBON NANOSTRUCTURES ON PHYSICO-MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF ELASTOMERS

Korolev P.V., Shilov M.A.

The paper presents the results of determining the influence of the spatial organization, concentration and orientation of carbon nanostructures (CNS) on the tribotechnical and physico-mechanical characteristics of elastomers based on SKI-3 rubbers. It is shown that rubbers with multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) at a concentration of 0,5 wt. % with orientation perpendicular to the impact.

Keywords: carbon nanostructures, hardness, adhesion, wear resistance.

Первый эффект широко описан в литературе [3]. Механическое поведение УНТ-композитов схоже с поведением композитов, наполненных активными марками технического углерода (ТУ), но при значительно меньшем содержании УНТ. Как известно, введение активных марок ТУ в структуру резиновых смесей сопровождается повышением модуля упругости, предела прочности при разрыве, снижения удлинения при разрыве, повышении твердости, износостойкости, сопротивления раздиру. В первом приближении, чем выше содержание наполнителя, тем выше жесткость материала, износостойкость, однако, одновременно существенно повышается теплообразование вследствие гистерезиса в условиях циклического нагружения. При введении относительно небольших дозировок УНТ аналогично наблюдается значительный рост модуля упругости материала, прочности на разрыв за счет эффективной передачи нагрузки с эластомерной матрицы (ЭМ) на наполнитель. Усиление каучуков обусловлено высоким AR и высокой удельной поверхностью одномерных наноструктур, выпрямлением изначально изогнутых УНТ в процессе растяжения до состояния жесткого стержня (это наиболее выгодная форма частиц наполнителя для придания жесткости материалу). Кроме того, в УНТ-композитах более выражен эффект Пейна, что указывает на интенсивные взаимодействия УНТ-

УНТ и эффективное формирование сетей нанонаполнителя в структуре ЭМ. Очевидно, что достижение эффекта усиления предопределяется строением и содержанием УНТ, степенью диспергирования массива УНТ, интенсивностью взаимодействия УНС с полимерной матрицей. При этом уровень взаимодействия УНТ с каучуком может быть увеличен путем ковалентной или не ковалентной модификацией поверхности УНТ.

Второй эффект описан в литературе гораздо меньше [4-6]. Наблюдается повышение начальной жесткости УНТ-композитов без уменьшения способности материала к растяжению, т.е. в процессе деформирования достигаются разрывные удлинения, близкие к исходному эластомеру. Повышение жесткости УНТ-композитов происходит, в основном, из-за выпрямления изогнутых УНТ в отличие от осевого напряжения, которое возникает в УНТ из-за сильного сцепления и передачи сдвиговой нагрузки от ЭМ на УНТ. Эксперименты показывают, что армирование каучука малыми количествами одностенных УНТ приводит к резкому увеличению начальной жесткости (удлинение 10-20 %), однако, в процессе растяжения из-за отслаивания УНТ от матрицы жесткость снижается до значений исходного эластомера, а композит демонстрирует поведение, подобное ЭМ. Считается, что УНТ-композиты, где отсутствуют прямые, прочные связи УНТ–каучук более пригодны для эластомерных композитов. Таким образом, варьируя содержание УНТ, их структуру можно существенно изменять механические свойства композитов на их основе. Кроме того, УНТ способны участвовать в процессах образования поперечных связей [4], формировать электро-, теплопроводящий каркас в структуре ЭМ [2]. Существует ряд работ по совершенствованию эксплуатационных свойств резин, применяемых в производстве пневматических шин [2-5]. В основном функционализация структуры осуществляется пространственными аллотропами углерода (GO, графит), обладающими свойствами трехмерных кристаллов, и фуллеренами (C₆₀, C₇₀, C₈₀), состоящими из углерода, находящегося в sp² гибридизации и обладающими уникальными свойствами: сверхпроводимостью, низкой теплопроводностью, высокой твердостью. В работе [5] показано, что наличие наноуглерода в составе структуры резины приводит к увеличению времени ее вулканизации, повышению твердости по Шору А и снижению прочности на разрыв, при этом использование фуллерена в качестве плёнки в резиновых композитах приводит к улучшению их

термической стойкости к старению. В температурном диапазоне высокоэластичного состояния увеличение фуллерена в небольшом количестве приводит к снижению значения тангенса угла механических потерь. В работе [6] представлены результаты по функционализации резин GO. Результаты экспериментов свидетельствуют о снижении механических потерь при растяжении, увеличению времени вулканизации и повышению термической стойкости к старению, как и в случае применения фуллеренов. Анализ работ [1-7] показал перспективность исследований по модификации резин аллотропами углерода. Следует отметить, что такие эксплуатационные свойства модифицированных резин как износ и усталостная деформация исследованы крайне недостаточно, что в свою очередь также определяет перспективность исследований.

В связи с выше изложенным, целью настоящей работы стало изучение влияния типа, концентрации и ориентации УНС на физико-механические и триботехнические характеристики.

Материалы и методы

В качестве ЭМ в работе рассмотрен стандартный эластомер, применяемый в шинной промышленности при изготовлении протекторной резины - СКИ-3. Его структурная формула представлена на рис. 1. Выбор материала был обусловлен широким распространением резин и композиционных материалов на его основе в шинной промышленности, отсутствием наполнителей, придающих конечному изделию специфические физико-механические и триботехнические свойства. Это позволило наиболее полно оценивать влияние армирования на эксплуатационные свойства.

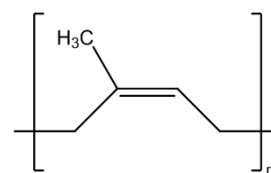


Рис. 1. Цис-изопреновый каучук СКИ-3

В качестве армирующего элемента использованы аллотропы углерода: GO и многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ). Графен многослойный окисленный (производства «ГТПН» ТГТУ и ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов), представляющий собой наноразмерный продукт в виде пластин с числом слоёв от 5 до 10, на периферии которых имеются гидроксильные и карбоксильные группы, толщина пластин 3–5 нм. (Таунит-М) – цилиндрические УНТ с внешним

диаметром 10-30 нм, внутренним 5-15 нм и длиной ≥ 2 мкм, общее количество примесей $\leq 5\%$. В качестве абразивного материала использовали дисковые образцы из асфальтобетона с возобновляемой поверхностью для сохранения постоянной шероховатости в ходе эксперимента. Для определения твердости применяли образцы в форме диска толщиной $10 \pm 0,2$ мм. Толщина верхнего слоя составляла 3,4 мм. Поверхность образцов была ровная и без посторонних включений. Величину твердости измеряли через 3 с после прижатия по шкале прибора ТМ-2. Контактное взаимодействие индентора и поверхности эластомерного образца проводили в трех разных точках, расстояние между которыми составляло 6 ± 1 мм, а от точек контакта до границы образца – 15 мм. Изучение адгезионного взаимодействия проводили в соответствии с [4], при этом не использовали адгезионные клеи. Состав наполнителя исследуемых образцов изменяли путем введения технического углерода (ТУ) и масла ПН-6 (с УНТ). Для приготовления образцов резиновую смесь снимали с вальцов или каландра в виде пластин толщиной 3,5-4,0 мм для образцов типа II и 4,5-5,0 мм – для образцов типа III. Из охлажденной до комнатной температуры пластины вырезали полоски шириной (9 ± 1) мм и длиной, соответствующей размеру каналов пресс-формы, которую закрывали крышкой и помещали в вулканизационный пресс, нагретый до температуры вулканизации резиновой смеси и обеспечивающий давление не менее 3,5 МПа в расчете на ее поверхность. После окончания вулканизации при заданных температуре и времени заготовку удаляли из пресс-формы и охлаждали при комнатной температуре. Выбор параметров испытаний эластомеров на износостойкость был обусловлен их эксплуатационными характеристиками. Скорость скольжения варьировалась от 0,5 до 3 м/с, удельная нагрузка от 0,1 до 1,5 МПа, температура окружающей среды от 22 до 40 °С. Абразивный диск, выполненный электрокорунда, имел твердость по Моосу 10 единиц. Средний размер зерен составлял 0,32 мм. Поверхность абразивного диска возобновлялась за счет применения металлических щеток, расположенных за образцом. Удаляли продукты износа эластомеров с помощью шкафвытяжки. В тестовых испытаниях фиксировали силу трения, температуру поверхности эластомерного образца, а интенсивность изнашивания определяли путем пересчета массового износа.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний для двух типов резин с различной ориентацией УНТ и графена представлены на рис. 2.

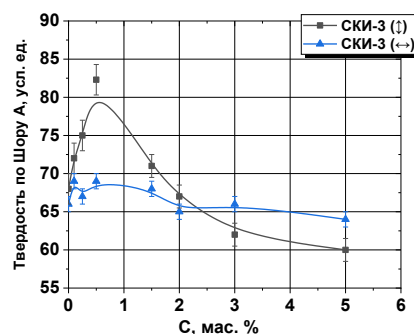


Рис. 2. Зависимость твердости эластомеров от концентрации УНТ для СКИ-3 с расположением УНТ параллельно (↑) и перпендикулярно (↔) направлению вдавливания индентора. Испытания проведены при температуре 22 °С

Как следует из графика, увеличение концентрации УНТ до 0,5 мас. % во всех случаях приводит к повышению величины твердости эластомерного материала. На наш взгляд, это связано с тем, что при данной концентрации ассоциация МУНТ минимальна, т.е. количество активных центров молекул МУНТ не превысила максимум. Однако, заметим, что дальнейшее повышение концентрации оказывает обратный эффект, по-видимому, связанный с активным взаимодействием УНТ между собой с образованием локальных центров ассоциированных молекул. Добавка GO в ЭМ не привела к изменению значения твердости эластомерного композита. Одной из важных триботехнических характеристик эластомерного материала является адгезия. Далее представлены экспериментальные данные по величинам адгезии изучаемых эластомеров, армированных УНТ, с текстильной и металлической мононитями (табл. 1). Изменение средних усилий отрыва обеих нитей из ЭМ зависит от концентрации МУНТ и их ориентации относительно направления действия нагрузки отрыва. Повышение концентрации МУНТ(↑) для обеих адгезионных пар (эластомер-текстильная мононить и эластомер-металлическая мононить) имеют общую тенденцию к повышению величины усилия разрыва до концентрации 0,5 мас. %. Повышение концентрации МУНТ(↑) до 5 мас. % приводит к снижению адгезионной способности эластомера. Поведение эластомеров на основе СКИ-3/ МУНТ(↔) носит иной характер. Рост концентрации МУНТ пропорционально повышает адгезионные характеристики эластомера. Анализ результатов эксперимента позволяет сделать вывод о

зависимости механических свойств резины и адгезионного взаимодействия наполнителя с ЭМ.

Табл. 3. Адгезионные характеристики эластомерных материалов на основе каучука СКИ-3, армированного МУНТ

Концентрация С, мас. %	Усилие разрыва, кН			
	Мононить (текстильная)		Мононить (металлическая)	
	МУНТ (↓)	МУНТ (↔)	МУНТ (↓)	МУНТ (↔)
Без УНС	0,11		0,038	
0,1	0,12	0,10	0,041	0,025
0,25	0,17	0,12	0,076	0,031
0,5	0,28	0,12	0,092	0,038
1	0,21	0,13	0,071	0,039
2	0,19	0,17	0,065	0,041
3	0,17	0,19	0,053	0,046
4	0,15	0,21	0,045	0,049
5	0,15	0,22	0,041	0,052

На рис. 3 приведен пример результатов определения зависимости интенсивности изнашивания от различных факторов.

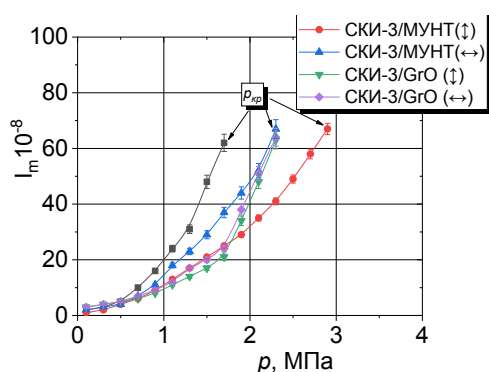


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания СКИ-3 от типа УНС, их ориентации и удельного давления при постоянной концентрации УНС 0,5 мас. %, температуре $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости скольжения 0,5 м/с

Отметим, что зависимость интенсивности изнашивания исследуемых эластомеров носит нелинейный характер и соответствует смешанному механизму изнашивания, где основным выступает абразивный. Следует отметить, что величина износостойкости резины на основе каучука СКИ-3/МУНТ(↓) в диапазоне прикладываемых удельных давлений превышает величину СКИ-3 в 2-3 раза. Практическая значимость полученных данных позволяет утверждать, что разработанный нами состав резины является перспективнее имеющемуся прототипу. Стабильность и прочность связей внутренней структуры, армированной МУНТ, повышенная условная прочность СКИ-3/МУНТ(↓), показанные в главе 3, являются основной причиной повышенной износостойкости. При исследовании структуры продуктов изнашивания эластомера

следует отметить отсутствие структурных изменений эластомера вследствие механического воздействия на цепные молекулы. Отличительной особенностью СКИ-3/МУНТ(↓) является способность работать в жестких режимах эксплуатации. Кроме того, отсутствие колебательных процессов в СКИ-3/МУНТ(↓) позволяет говорить о расширении нагрузочного диапазона использования вплоть до 2,9 МПа. Для СКИ-3 критическое значение составляло 1,7 МПа. Превышение этого значения приводило к развитию релаксационных процессов. Отметим, что скоростной режим не повлиял на вид кривых интенсивности изнашивания.

Заключение

В результате определения физико-механических и триботехнических характеристик ЭМ на основе каучука СКИ-3, армированных УНС показано, что наибольшим значением показателя твердости и лучшими адгезионными характеристиками обладает ЭМ на основе СКИ-3/МУНТ(↓) с концентрацией УНС 0,5 мас. %. Отличительной особенностью образцов СКИ-3/МУНТ(↓) с концентрацией УНС 0,5 мас. % является наличие максимального значения усилия отрыва как при адгезионном взаимодействии с текстильной мононитью, так и с металлической. Полученные зависимости интенсивности изнашивания исследуемых эластомеров имеют смешанный механизм изнашивания, где основным выступает абразивный. Получена оптимальная концентрация МУНТ, при которой достигался максимальный эффект ее действия. Стендовые испытания образцов СКИ-3/МУНТ(↓) показали высокую износостойкость в диапазоне удельных давлений до 2,9 МПа.

- [1] Meng F. et al. Graphene- based fibers: a review // Advanced materials. – 2015. – Т. 27. – №. 35. – С. 5113-5131.
- [2] Li S. et al. Nanocomposites of graphene nanoplatelets in natural rubber: microstructure and mechanisms of reinforcement //Journal of Materials Science. – 2017. – Т. 52. – №. 16. – С. 9558-9572.
- [3] Liu M. et al. Micromechanics of reinforcement of a graphene-based thermoplastic elastomer nanocomposite //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Т. 110. – С. 84-92.
- [4] Thomas S., Maria H. (Eds.) Progress in Rubber Nanocomposites. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing. 2017. – 598 с.
- [5] Szeluga U., Kumanek B., Trzebicka B. Synergy in hybrid polymer/nanocarbon composites. A review //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2015. – Т. 73. – С. 204-231.
- [6] Wang J. et al. Graphene-Rubber Nanocomposites: Preparation, Structure, and Properties. Springer international Publishing AG 2017. – С. 175-209.
- [7] Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю., Морозов А.В., Степанов Ф.И. Трение эластомеров. Моделирование и эксперимент. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. – 204 с.

ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ

¹Короткевич С.В.*, ²Буяновский И.А.

*E-mail: korotstv@tut.by

¹РУП «Гомельэнерго», Гомель, Республика Беларусь;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Поиск и установление основных положений, описывающих физико-химические процессы, протекающие на стыке различных естественных наук: физики, химии, механики, наноматериаловедении, неравновесной термодинамики и др. является актуальнейшей проблемой современной науки. Все естественные процессы, в том числе и создание наноматериалов, протекают в пространственно-временном континууме, свойства симметрии которого должны определять наличие инвариантных, фундаментальных закономерностей для описания процессов формирования и эволюции структуры поверхности раздела металлов при внешних воздействиях: прокатка, трибо-нагружение, воздействие внешних сред и т.д.

Ключевые слова: симметрия, принцип наименьшего действия, инварианты.

Введение

По образному выражению Л.Д. Ландау «законы сохранения или инварианты являются бухгалтерией в физике». Без использования законов сохранения (электрического заряда, энергии и т. д.) невозможно рассчитать параметры ядерных реакций. Принцип наименьшего действия используется для составления уравнений движения материальной точки в механике [1]. Почему нельзя использовать данный фундаментальный принцип для описания кинетики процессов структурных преобразований, протекающих в пространстве и времени [2, 3]? Установление фундаментальных закономерностей формирования, эволюции и разрушения поверхностного слоя металлов является основной проблемой физики конденсированного состояния, трибологии и материаловедения и др. естественных наук [4]. Естественно возникает вопрос, а именно: там, где есть симметрия должны быть инварианты при описании кинетики различных структурных преобразований при многоуровневых иерархически организованных процессах, протекающих на поверхности металлов? В настоящее время отсутствуют научно обоснованные основополагающие принципы, применяемые на стыках различных наук. Современное состояние проблемы

HAMILTON'S PRINCIPLE

Korotkevich S.V., Buyanovskii I.A.

The search and establishment of the main provisions describing the physical and chemical processes occurring at the interface of various natural sciences: physics, chemistry, mechanics, nanomaterials science, nonequilibrium thermodynamics, etc. is the most urgent problem of modern science. All natural processes, including the creation of nanomaterials, proceed in a space-time continuum, the symmetry properties of which should determine the presence of invariant, fundamental regularities for describing the processes of formation and evolution of the metal interface structure under external influences: rolling, triboloading, the impact of external media and etc.

Keywords: symmetry, principle of least action, invariants.

создания, разрушения и изнашивания материалов характеризуется, как переходной период между накоплением опытных данных и их интерпретацией в категориях механики, физики, химии. Сложность исследования поверхности раздела при внешних воздействиях определяется одновременным протеканием нескольких процессов (теплопроводность, диффузия, массоперенос, упрочнение, аморфизации, разрушения и т.д.) и правильном выборе масштабного фактора (нагрузочно-скоростных параметров и т.д.) внешнего воздействия, что позволяет установить протекание доминирующего процесса в их многообразии (разделить сложный процесс на более простые) и, как следствие, выявить и установить основные фундаментальные (инвариантные) закономерности.

Целью настоящей работы является установление основных принципов: энергетической выгоды и наименьшего действия, описывающих кинетику структурообразования поверхности раздела металлов, и использование их для установления основных закономерностей формирования и кинетики деформационных дефектов.

Материалы и методы

Исследовался поликристаллический никель чистотой 99,99%. Образцы в виде тонких дисков полировались электролитически и отжигались в вакууме 0,133 мПа при 973 К. Испытание на трение пары Ni – Мо проводилось на машине АЕ-5 с точной установкой площади контактирования при удельной нагрузке ≈ 84 кПа и линейной скорости $\approx 0,5$ м/с. Электронно-микроскопические исследования никеля осуществлялись на микроскопе ЭВМ-100АК и Hitachi-H800 методом тонких фольг на «просвет». Разрешение Hitachi H-800 составляет $\approx 0,1$ нм. Методика исследований описана в работе [5].

Результаты и их обсуждение. Кинетика перехода системы из одного структурного состояния (А) в другое (В) осуществляется в соответствии с принципом наименьшего действия (рис. 1). В работах [6-8] показано, что формирование наноструктур при $t = 0,9$ кс также протекает в соответствии с вышеназванным принципом. Релаксация энергии в нижележащие слои невозможна ввиду того, что образцы предварительно отожжены в вакууме и поверхности энергетически выгодно сформировать наноструктуры. Количество вещества, выраженное в молях, как показывает расчёт при этом вырастает на два-три порядка. Увеличение площади сформированных наноструктур на порядки обуславливает увеличение релаксации энергии поверхностным слоем.

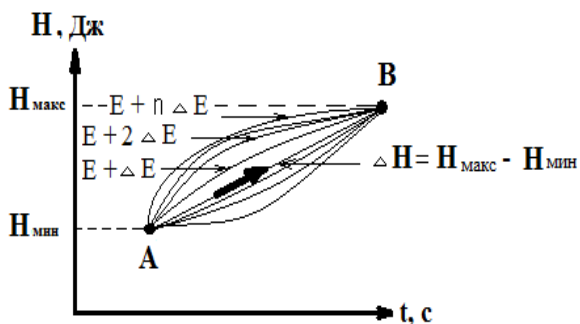


Рис. 1. Кинетика перехода системы из одного структурного состояния (А) в другое (В) в соответствии с принципом наименьшего действия

Кинетика структурных преобразований, изображённых на рис. 2, протекает в соответствии с энергетической выгодностью.

Обсуждение

Механизм послойно-лепесткового разрушения поверхности никеля так же протекает в соответствии с энергетической выгодностью, где отделение лепестка или частицы износа способствует снижению значений напряжений, и

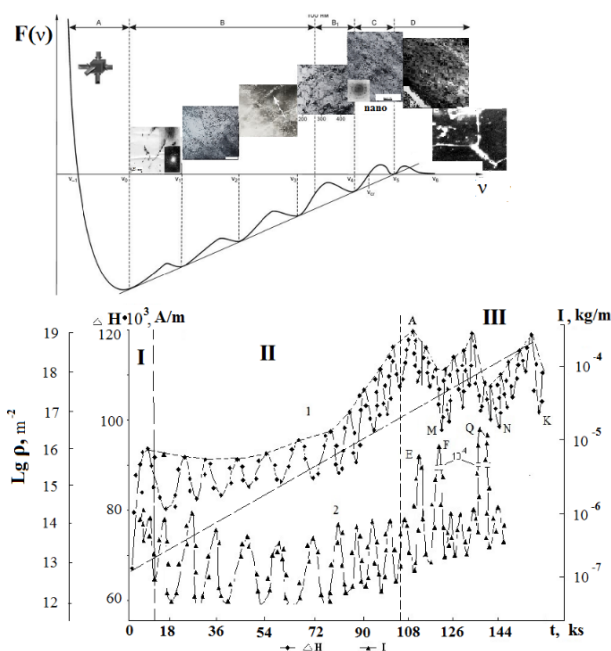


Рис. 2. Зависимость потенциала Гиббса $F(v)$, плотности дислокаций (ρ) и интенсивности изнашивания (I) от времени трения (t)

как следствие, замедление распространения трещин вглубь металла и сохранение его целостности. Поверхность самоорганизуется или продляет свою долговечность посредством локального во времени отделения частиц изнашивания в соответствии с принципом наименьшего действия. Селективный механизм разрушения (точки E, F, Q на рис. 2) сопровождается увеличением на три порядка интенсивности изнашивания (I) и характеризуется локализованным во времени лавинообразным избирательным разрушением целого поверхностного слоя никеля толщиной до сотни мкм. Процесс отделения слоя локализован во времени в конкретных значениях времени (рис. 2) и протекает в соответствии с принципом наименьшего действия, где поверхности энергетически выгодно отделить сильно диспергированный и пористый слой [9]. Данный процесс самоорганизации напоминает процесс линьки кожного покрова у животных, где отделяется дефектная кожа и происходит смена эпидермиса. Кинетика изменения амплитуды уширения линии ФМР $(\Delta H(t))$ в соответствии с соотношением золотого сечения, где меньшая величина амплитуды относится к большей, как большая величина амплитуды относится к наибольшей (первый цикл (рис. 2)). Симметрия кинетики $\Delta H(t)$ выражается и в том, что упрочнению поверхности соответствует и её разупрочнение для каждого цикла изменения прочностных свойств поверхности никеля. Верный выбор масштабного фактора действия нагрузочно-скоростных

параметров позволил увидеть, что кинетика изменения уширения линии ФМР находится в противофазе кинетики изменения интенсивности изнашивания [5]. Масштабная инвариантность кривизны кристаллической решетки на поверхностях трения металлических материалов как основа механизма их изнашивания убедительно показана в статьях [8, 10]. Три инварианта описаны в работе [11].

Заключение

Авторами предложено применение принципа наименьшего действия для описания кинетики структурообразования поверхности раздела металлов при трибонагружении. Убедительно доказано, что его использование определяет поиск и установление инвариантов или фундаментальных закономерностей формирования и кинетики деформационных дефектов. Последнее устанавливает не только направление развития трибологии, материаловедения и других дисциплин, а также определяет качество их развития, ибо определение инвариантов требует системной и кропотливой экспериментальной и теоретической работы научных школ и преемственности идей поколений научных работников.

Авторы высказывают благодарность талантливому экспериментатору и физику д.т.н., профессору В.Г. Пинчуку, а также академику РАН, д.ф.-м. наук, профессору В.Е. Панину.

- [1] Ландау Л. Д. Теоретическая физика в десяти томах. Т. 1 Механика/ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. – 1988. – 215 с.
- [2] Короткевич, С.В. Износостойкость металлов при граничном трении / С.В. Короткевич, В.Г. Пинчук, С.О. Бобович. – Гомель: УО Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2011. – 240 с.
- [3] Korotkevich S.V. Hamilton's principle for to search of invariants at creation, evolution and destruction of nanomaterials/ S.V. Korotkevich // International Journal of Engineering Research and Science. – 2018. – Vol. 4. – № 6. – P. 31–41.
- [4] Короткевич С.В. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Структурно-масштабные уровни деформации и свойства границ раздела в металлах» / Короткевич С.В. – Минск: БГУ, 2021. – 54 с.
- [5] Пинчук В.Г., Короткевич С.В. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении //LAP Lambert Academic Publishing.–Saarbrücken: LAP. – 2014. – 180 с.
- [6] Korotkevich S.V. The Principle of Least Action and Invariants, Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration: proc. of International Conference, Beijing, PRC, China, 31 March 2022. – Part 2: Participants' reports in English. – p. 34–42, DOI: 10.34660/INF.2022.59.57.004
- [7] Korotkevich S.V. The Principle of Energy Profitability and Least Action in Materials Science / S.V. Korotkevich, Principle of Energy Profitability and Least Action in Materials Science, Proceedings of the LXIV International Conference "Actual Problems of Strength", April 4-8, 2022, editor D.V. Zaitsev. – Ekaterinburg: UGUU Publishing House, 2022. – 401 p.
- [8] Korotkevich S.V. Multiscaling of Lattice Curvature of the Nickel, Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration: proc. of International Conference, Beijing, PRC, China, 20 April 2022, Part 1: Participants' reports in English, – С. 174–182. DOI: 10.34660/INF.2022.65.80.136
- [9] Пинчук В.Г., Буяновский И.А., Короткевич С.В. Кинетика микроструктуры и селективный механизм разрушения поверхностного слоя металла при трении //Материаловедение. – 2015. – №. 3. – С. 36-43.
- [10] Panin V. E. et al. Multiscaling of lattice curvature on friction surfaces of metallic materials as a basis of their wear mechanism //Physical Mesomechanics. – 2017. – Т. 20. – №. 1. – С. 69-77.
- [11] Короткевич С.В., Буяновский И.А. Инварианты в трибологии и материаловедении // Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 131-135.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ГРАДИЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ» ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Кренив Л.И. *, Айзикович С.М., Николаев А.Л.

*E-mail: lkrenev@yandex.ru

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия.

В статье дано краткое описание информационной системы (ИС) «Градиентные покрытия», предназначенной для построения решений ряда смешанных осесимметричных граничных задач упругости и термоупругости для непрерывно неоднородных покрытий сложной структуры, а также для анализа результатов расчетов и натурных экспериментов. Работа с системой иллюстрируется анализом результатов наноиндентирования покрытий ZnO на кремниевых подложках, полученных с использованием импульсного лазерного напыления.

Ключевые слова: информационные системы, моделирование, оксид цинка, наноиндентирование, градиентные покрытия.

Введение

Защитные покрытия широко используются при производстве конструкций и деталей машин для минимизации повреждений, вызываемых как механическими, так и тепловыми нагрузками.

С 80-х годов прошлого века развитие измерительной техники позволило активно использовать наноиндентирование, то есть прецизионное локальное силовое воздействие на материал и регистрацию смещения индентора в нанометровом диапазоне [1, 2].

В классической работе Oliver и Pharr [3] предложен метод анализа результатов индентирования с использованием индентора Берковича. Эта методика позволяет определить модуля Юнга образца на основании анализа жесткости индентирования (производной нагрузки по глубине внедрения индентора) при максимальной глубине внедрения индентора. При этом необходимо знать зависимость площади области контакта от глубины внедрения. Для однородных материалов она определяется из калибровочных экспериментов на эталонных образцах с заранее известными свойствами.

При индентировании материалов с покрытиями определяемое в эксперименте значение модуля Юнга зависит от размера области контакта. Для решения проблемы определения свойств покрытия и

ANALYSIS OF NANOINDENTATION USING THE INFORMATION SYSTEM "GRADIENT COATINGS"

Krenev L.I., Aizikovich S.M., Nikolaev A.L.

The article gives a brief description of the information system "Gradient coatings" designed to construct solutions to a number of mixed axisymmetric boundary problems of elasticity and thermoelasticity for continuously inhomogeneous coatings of a complex structure, as well as to analyze the results of calculations and experimental data. The operation of the system is illustrated by the analysis of the results of nanoindentation of ZnO coatings on silicon substrates obtained using pulsed laser deposition.

Keywords: information systems, zinc oxide, modeling, nanoindentation, gradient coatings.

подложки разными авторами используются в основном численные методы, например, метод конечных элементов (МКЭ) [4,5].

Под руководством Айзиковича С.М. [6] разработан оригинальный метод решения смешанных статических задач упругости и термоупругости для непрерывно-неоднородного по глубине полупространства при заданных на поверхности усилиях и источниках напряжений. Используя этот метод в ИС «Градиентные покрытия» можно обработать экспериментальные данные, получить зависимость модуля Юнга от ширины области контакта и, зная толщину покрытия, оценить значение его модуля Юнга.

В настоящей работе использовались результаты наноиндентирования покрытий ZnO разной толщины, нанесенные на Si (001) подложки. Такого рода покрытия широко используются в солнечных батареях [7], медицинских устройствах [8], современной электронике [9,10] и других важных приложениях.

Материалы и методы

Решение смешанных осесимметричных задач о внедрении индентора в непрерывно-неоднородное полупространство сводится к решению систем парных интегральных уравнений, трансформанты ядер которых аппроксимируются квадратичным рациональным выражением. Парное интегральное

уравнение с таким ядром имеет точное аналитическое решение. При построении трансформант ядер интегральных уравнений используется преобразование Ханкеля, а система обыкновенных дифференциальных уравнений с функциональными коэффициентами решается численно.

Для проведения численных расчетов, реализующих эту методику, сохранения результатов расчетов и проведения в дальнейшем их многопараметрического анализа, разработана информационная система, расчетная часть которой реализована на Fortran Powerstation 4.0.

Исходные данные и результаты расчетов сохраняются и обрабатываются в базе данных (БД), которая поддерживается с помощью Системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL. Результаты расчетов предваряются ключевыми атрибутами, содержащими код задания и код описателя расчетной информации. Для обработки результатов экспериментов в БД сохраняются описания типов инденторов, справочник материалов, описания исследуемых материалов с перечнем свойств подложки и слоев, результаты индентирования. Веб-интерфейс информационной системы «Градиентные покрытия» разработан на языке Python с помощью библиотеки Django. Рабочая версия сайта поддерживается сервером Apache с модулем mod_wsgi.

Сайт доступен по адресу <http://109.195.227.87:8090>

Конструкция сайта предполагает возможность без регистрации ознакомиться с описанием назначения ИС и списком решаемых задач. При регистрации пользователь получает доступ к основным режимам ИС, при этом, для удобства пользователя ему копируются образцы описаний законов изменения свойств покрытий, воздействий, самих покрытий и другие объекты.

Меню сайта включает в себя пункты:

- Теория
 - Законы неоднородности
 - Воздействия
 - Покрытия
 - Параметры расчета
 - Расчет
- Эксперимент
 - Типы инденторов
 - Инденторы
 - Справочник материалов
 - Исследуемые материалы
 - Результаты исследования
- Анализ результатов

- Выйти

Первый пункт информационный, остальные вызывают интерактивные формы, позволяющие работать с перечнями сохраненных в базе данных объектов. В разделе «Теория» представлены:

- список законов изменения свойств;
- список воздействий (внедрение штампов, рост дисковых трещин и т.п.);
- список различных покрытий;
- список дополнительных параметров расчета;
- список заданий на расчет с указанием конкретных покрытий, воздействий и дополнительных параметров;

Списки законов неоднородности, покрытий, воздействий содержат графические миниатюры, помогающие пользователю ориентироваться при выборе.

Каждый пункт списка включает кнопки «Изменить» и «Удалить», в шапке таблицы есть пункт «Добавить». Таким образом пользователь имеет возможность добавлять, изменять и удалять любые объекты. Кроме того, есть кнопка «Добавить копию», с ее помощью облегчается создание сложных объектов, мало отличающихся от предыдущих.

Функциональность ИС расширена режимом «Эксперимент» для обработки результатов наноиндентирования. Списки «Типы инденторов» и «Справочник материалов» содержат общие для ИС записи, которые нельзя удалять и изменять, но пользователь может вносить свои записи. Список «Исследуемые материалы» позволяет описать структуру покрытия. При работе с пунктом «Результаты исследования» пользователь указывает конкретный индентор и исследуемый материал и должен передать на обработку заархивированные каталоги с файлами «сила-смещение-время». Файлы должны быть в текстовом формате или в исходном формате «.idr». Обработка данных ведется с использованием метода Оливера-Фарра. Все параметры доступны для редактирования. В результате выводится таблица с расчетными характеристиками для всех экспериментов, сгруппированными по исходным файлам. Пользователь может выводить из рассмотрения отдельные эксперименты или файлы и пересчитывать результат.

Для реального экспериментального исследования выбраны полученные методом импульсного лазерного напыления образцы покрытий ZnO на подложках Si (001). Параметры напыления были следующие: плотность мощности

лазерного излучения 2 Дж/см^2 , расстояние мишень-подложка 5 см, температура синтеза $500 \text{ }^\circ\text{C}$, давления кислорода при напылении: $2 \cdot 10^{-2}$ мбар частота следования импульсов: 10 Гц, мишень из чистого ZnO (керамика), энергия лазерного импульса: 200 мДж, всего выполнено 6000 импульсов для покрытия толщиной 650 нм и 3000 импульсов для покрытия толщиной 430 нм.

Измерение толщины покрытия производилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Crossbeam 340 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия) с использованием детектора Эверхарта-Торнли и ускоряющим напряжением 1,5 кВ. Для этого в покрытии делалась кросс-секция посредством фокусированного ионного пучка (Рис.1).

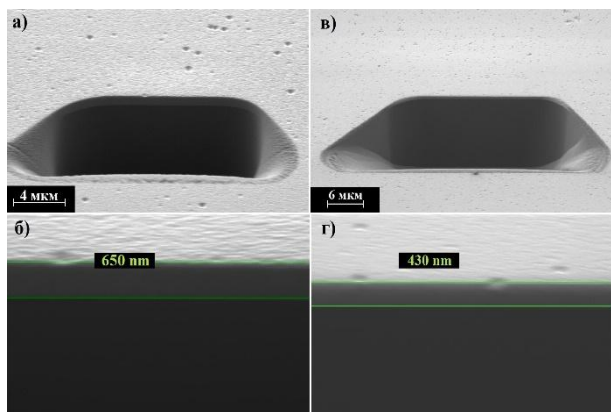


Рис. 1. Измерение толщины покрытия ZnO толщиной 650 нм (а, б) и 430 нм (в, г) с помощью СЭМ

Для оценки механических свойств покрытия была проведена серия экспериментов по наноиндентированию на установке Nanotest 600 Platform 3 (Micro Materials, Великобритания) с использованием алмазного индентора Берковича. Эксперименты проводились при постоянной температуре $27,0 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ в закрытой камере. Перед проведением экспериментов были выполнены калибровки прибора с использованием эталонных образцов плавленого кварца и сапфира.

На первом этапе было проведено исследование свойств подложки сразу после пробоподготовки. Были выполнены серии внедрений по 8 штук с нарастающей силой $1 \text{ мН} \leq P_{\text{max}} \leq 100 \text{ мН}$ на расстоянии друг от друга не менее 5 диаметров отпечатков, при этом максимальная глубина внедрения составила $33 \text{ нм} \leq h_{\text{max}} \leq 662 \text{ нм}$. Анализ кривых «сила – осадка» проводился согласно методу Оливера – Фарра. Значение коэффициента Пуассона подложки принято равными $\nu = 0,27$. Таким образом, значение приведенного модуля Юнга составило $158,97 \pm 5,86 \text{ ГПа}$.

Для оценки свойств покрытий ZnO выполнены серии внедрений по 12 штук с нарастающей силой $1 \text{ мН} \leq P_{\text{max}} \leq 200 \text{ мН}$ на расстоянии друг от друга не менее 5 диаметров отпечатков, при этом максимальная глубина внедрения составила $30 \text{ нм} \leq h_{\text{max}} \leq 955 \text{ нм}$. Значение коэффициента Пуассона ZnO принято равными $\nu = 0,25$.

Результаты и обсуждение

С помощью ИС «Градиентные покрытия» на примере анализа результатов индентирования описанных ранее Si и покрытий ZnO на Si, был рассчитан модуль Юнга покрытий.

На рис. 2 представлены результаты определения модуля Юнга для однородного кремния и кремния с покрытиями оксида цинка с толщиной 430 нм и 650 нм в зависимости от расчетного радиуса области контакта.

В режиме «Теория» была проведена серия расчетов жесткости основания (соответствует расчетному модулю Юнга) для соотношения модулей покрытия к модулю подложки от 1/5 до 5, при изменении отношения радиуса области контакта к толщине покрытия от 0 до 4. Результаты представлены на рис. 3.

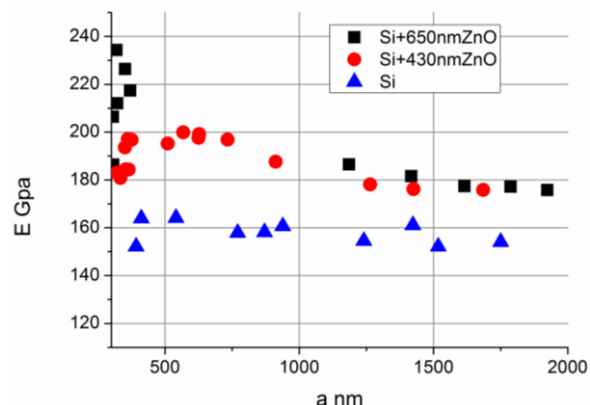


Рис. 2. Изменение расчетного модуля Юнга Si, Si+650 нм ZnO и Si+430 нм ZnO в зависимости от радиуса расчетной зоны контакта

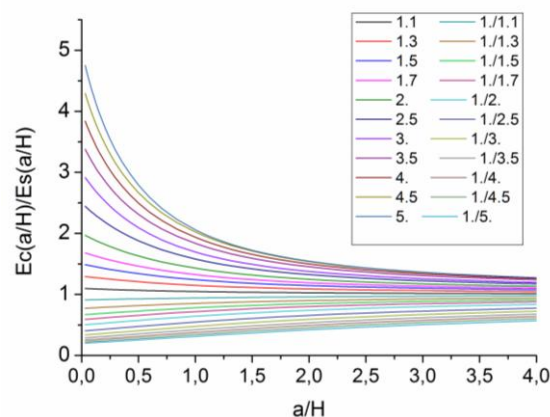


Рис. 3. График жесткости основания для серии отношений модулей Юнга покрытия и подложки

Таблица результатов расчета, приведенных на графике, встроена в расчетный модуль режима «Результаты исследования». Благодаря этому мы, зная толщину покрытия и модуль Юнга подложки, можем оценить модуль Юнга покрытия для каждого эксперимента.

На рис. 4 приведены результаты расчета модуля Юнга покрытий толщиной 650 нм и 430 нм в зависимости от отношения радиуса зоны контакта к толщине. Несмотря на большой разброс в начале графика, можно предположить, что модуль Юнга ZnO равен 250 ГПа.

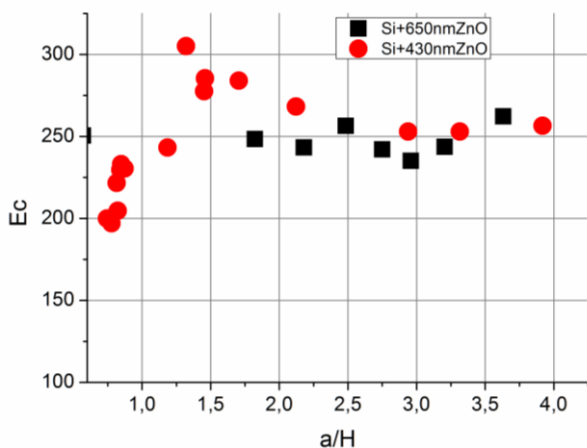


Рис. 4. Результат оценки модуля Юнга ZnO

На рис. 5 проведено сопоставление теоретических кривых изменения модуля Юнга системы покрытие-подложка и результатов наноиндентирования. Можно отметить хорошее совпадение результатов в зоне малого разброса экспериментальных данных.

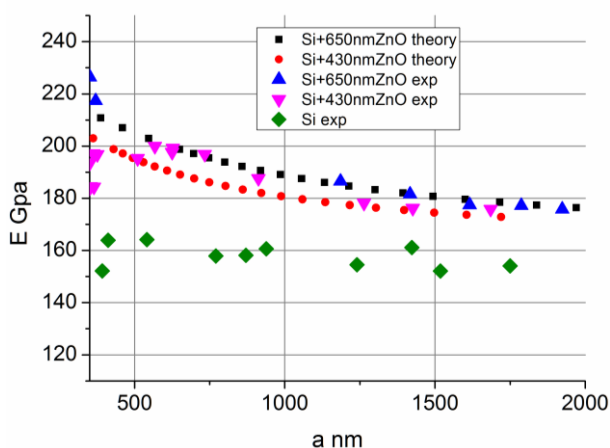


Рис. 5. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных при значении модуля Юнга ZnO равном 250 ГПа

Заключение

В работе представлено краткое описание ИС «Градиентные покрытия», предназначенной для построения решений смешанных осесимметричных граничных задач упругости и термоупругости для непрерывно неоднородных покрытий сложной структуры, а также для анализа результатов расчетов и экспериментальных данных.

Показаны возможности системы при анализе экспериментальных данных. По результатам наноиндентирования определено значение модуля Юнга (250 ГПа) двух покрытий ZnO (430 нм и 650 нм), полученных методом импульсного лазерного напыления на подложках Si (001).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 19-19-00444).

- [1] Golovin Y.I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films: A Review //Physics of the solid State. – 2008. – Т. 50. – №. 12. – С. 2205-2236.
- [2] Fischer-Cripps A. C., Nicholson D. W. Nanoindentation. Mechanical engineering series //Appl. Mech. Rev. – 2004. – Т. 57. – №. 2. – С. B12-B12.
- [3] Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments //Journal of materials research. – 1992. – Т. 7. – №. 6. – С. 1564-1583.
- [4] Kot M. et al. Analysis of spherical indentations of coating-substrate systems: experiments and finite element modeling //Materials & Design. – 2013. – Т. 43. – С. 99-111.
- [5] Karimpour M. et al. An inverse method for extracting the mechanical properties of the constituent materials of a multilayer from nanoindentation data //Computational materials science. – 2013. – Т. 68. – С. 384-390.
- [6] Айзикович С.М., Александров В.М., Трубчик И.С., Крнев Л.И., Белоконь А.В. Контактные задачи теории упругости для неоднородных сред. М.: Физматлит, 2006. – 240 с.
- [7] Alhammadi S., Park H., Kim W. K. Optimization of intrinsic ZnO thickness in Cu (In, Ga) Se₂-based thin film solar cells //Materials. – 2019. – Т. 12. – №. 9. – С. 1365.
- [8] Shetti N.P. et al. ZnO-based nanostructured electrodes for electrochemical sensors and biosensors in biomedical applications //Biosensors and Bioelectronics. – 2019. – Т. 141. – С. 111417.
- [9] Nikolaev A. L. et al. Synthesis of ZnO nanorods for piezoelectric resonators and sensors //Journal of Advanced Dielectrics. – 2022. – Т. 12. – №. 01. – С. 2160020.
- [10] Zhilin D.A. et al. Photoelectric Properties of Metal-Semiconductor-Metall Structure Based on ZnO Nanorods Designed Thermal Evaporation and Carbothermal Methods //Advanced materials-studies and applications. – 2015. – С. 57-64.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СПЕЧЕННОГО ПОРОШКОВОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА Fe-ОСНОВЕ В ДИСКОВОМ ОСТАНОВОЧНОМ ТОРМОЗЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ ИНЕРЦИОННОМ СТЕНДЕ

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.*

*E-mail: au@vstu.ru

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия.

Проведены триботехнические испытания спеченного порошкового фрикционного материала сухого трения на Fe-основе в дисковом остановочном тормозе (ОТ) механизма передач и поворота (МПП) транспортной гусеничной машины (ГМ) с большой удельной мощностью (свыше 30 л.с./Т) на дизельном инерционном стенде. ОТ работает с большими скоростями скольжения фрикционной пары – спеченный материал типа СМК-80 по комбинированному контртелу – чугуну/стали. Проведены работы по определению динамического момента трения и динамического коэффициента трения ОТ. Работа может быть использована при проектировании и производстве тормозных устройств трансмиссий легких ГМ.

Ключевые слова: дисковый ОТ, инерционный дизельный стенд, инерционная масса, трение всухую, момент трения, коэффициент трения.

Введение

В настоящее время, широко используются инерционные электростенды для исследования трансмиссий и их узлов, в том числе стенды с тремя электродинамометрами, для легких ГМ в виду их простоты, доступности и дешевизны. Эти стенды имеют ограниченные возможности для проведения динамических исследований, так как на них трудно имитировать работу ДВС, которые устанавливаются на транспортных средствах.

Цели и задачи исследования.

Получение результатов триботехнических испытаний трущихся материалов фрикционных и тормозных устройств трансмиссий легких ГМ с большой удельной мощностью на дизельном инерционном стенде, приближающим условия испытаний к условиям эксплуатации трансмиссий, является актуальной задачей [1,2].

Целью работы является получение результатов комплексных триботехнических испытаний спеченных фрикционных материалов сухого трения на Fe-основе в высокооборотных дисковых ОТ легких ГМ на стенде с дизельным ДВС, устанавливаемым на транспортном средстве.

TRIBOTECHNICAL TESTING OF FE -BASED SINTERED POWDER FRICTION MATERIAL IN DISC STOP BRAKE ON DIESEL INERTIAL STAND

Krykhtin Yu.I., Karlov V.I.

Tribotechnical tests of sintered dry friction powder material on Fe-base in disk stop brake (DSB) of the transmission and turning mechanism (TTM) of tracked vehicle (TM) with high specific power (over 30 hp/T) on a diesel inertial stand were carried out. The SB works at high sliding speeds of the friction - sintered material of type СМК-80 on a combined counterbody - cast iron/steel. Works were carried out to determine dynamic friction moment and dynamic coefficient of friction SB. The work can be used in the design and production of braking devices of TM light transmissions.

Keywords: disc SB, inertial diesel stand, inertial mass, dry friction, friction moment, friction coefficient.

Новизной исследовательской работы

является результаты комплексных триботехнических испытаний спеченного порошкового фрикционного материала на Fe-основе в дисковом ОТ, работающем с большими скоростями скольжения по комбинированному контртелу чугуна/стали, на дизельном инерционном стенде, в котором в качестве инерционных масс используются компактные роторы индукторного тормоза (РИТ) с двухступенчатым (с прямой и повышающей ступенью) редуктором на входе в индукторный тормоз, связанным с МПП через ОТ.

Материалы и методы исследования.

На дисках трения применены секторные накладки со спеченным фрикционным материалом на железной основе типа СМК-80 [3, 4, 5], поверхности контртел сплошные.

На рис. 1 показана кинематическая схема дизельного инерционного стенда, разработанного на базе имеющегося на производящем трансмиссии предприятии технологического оборудования, на котором используется МПП трансмиссии ГМ массой 17,5 тонн с 2-х дисковыми ОТ,

установленными на корпусе МПП и связанными с выходными валами МПП.

Чугунные корпус и крышка тормоза связаны с корпусом МПП. Выходной вал ОТ через зубчатую муфту связан с торсионным валом, который соединяется с редуктором, имеющим два передаточных отношения: $i_{1ред} = 0,292$ и $i_{2ред} = 1$. Редуктор связан с ротором индукторного тормоза ИТ-ГАП-11, который является инерционной массой, имитирующей инерционную массу ГМ, приходящуюся на один борт.

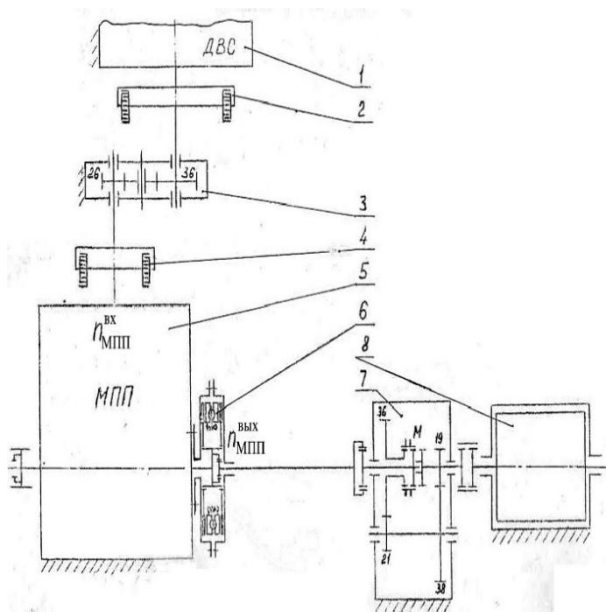


Рис. 1. Кинематическая схема дизельного инерционного стенда: 1 – ДВС; 2 – фрикционная муфта; 3 – согласующий редуктор; 4 – главный фрикцион; 5 – МПП; 6 – ОТ со стальными нажимными дисками, с шариковым нажимным механизмом типа «слезки», с полуромбовым тянущим механизмом включения и гидроцилиндром для усиления; 7 – двухступенчатый согласующий редуктор с зубчатой муфтой М для переключения ступеней; 8 – ротор индукторного тормоза; $n_{МПП}^{вх}$; $n_{МПП}^{вых}$ – обороты входного вала и выходных валов МПП соответственно

На рис. 2 показано изменение кинетической энергии W_k ГМ от угловой скорости ω при $n_{МПП}^{вх} = 2400$ об/мин для одного ОТ в изделии и $n_{МПП}^{вх} = 1820$ об/мин для одного ОТ в стенде

Момент инерции поступательного движения ГМ, приведенный к оси ОТ (выходного вала МПП), определяется по формуле:

$$J_{II} = \frac{G \cdot R_{зв}^2}{g \cdot i_{бп}^2} = \frac{17 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 0,292^2 \text{ м}}{9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 7,908^2} = 2,363 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2,$$

где G – вес ГМ; $R_{зв}$ – радиус ведущего колеса гусеничного движителя; g – ускорение свободного падения; $i_{бп}$ – передаточное отношение бортовой передачи ГМ.

С добавлением приведённого к оси ОТ момента инерции $J_{вр} = 0,693 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ вращающихся деталей полный момент инерции ГМ (приведенный к оси ОТ) равен: $J_{\Sigma} = J_{II} + J_{вр} = 2,363 + 0,693 = 3,056 \text{ (кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2)$. Определение момента инерции РИТ $J_p = 0,225 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, связанного с выходным валом МПП, производится по геометрическим размерам РИТ.

С каждой стороны МПП на выходной (на стенде) вал для имитации работы ГМ требуется установить маховик, имеющий момент инерции

$$J_{\max} = \frac{3,056 - 0,45}{2} = 1,303 \text{ (кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2).$$

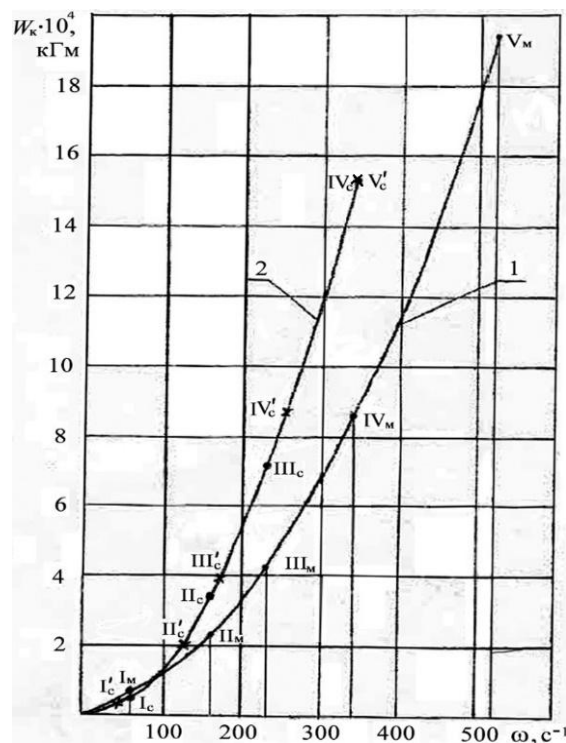


Рис. 2. Изменение кинетической энергии W_k от угловой скорости ω : 1 – для одного ОТ в ГМ (масса 1814 кг, максимальная скорость 70 км/час), $n_{МПП}^{вх}=2400$ об/мин и $I_c \dots V_m$ – передачи в МПП на ГМ; 2 – для одного ОТ на стенде: $I_c \dots IV_c$ – передачи в МПП, $n_{МПП}^{вх}=2400$ об/мин и $I'_c \dots V'_c$ – передачи в МПП, $n_{МПП}^{вх}=1820$ об/мин

Момент инерции одного РИТ, приведенный к оси ОТ, $J_{p,прив} = J_p / i_{ред} = 2,638 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, что значительно больше, чем требуется для имитации работы ГМ на стенде (примерно в два раза). Здесь: $i_{1ред} = 0,292$.

Работа трения двух ОТ МПП на стенде равна кинетической энергии ГМ при движении с максимальной скоростью, определяемой по формуле $W_k = \frac{mV_{\max}^2}{2} = 298 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}$, где $m = 1784 \text{ кг}$ – масса ГМ; $V_{\max} = 65,79 \text{ км/час}$ – максимальная скорость движения ГМ на пятой (высшей) передаче.

По полученный осциллограмме при торможении выходного вала МПП, связанного с РИТ, определяются значения времени t_T снижения угловых скоростей РИТ с $\omega_{p.t.max}$ до нуля. Замедления определяются на примерно равнозамедленном участке осциллограммы с момента начала падения оборотов РИТ до момента $\omega_{p.t.min}$, отстоящего на $t = 0,4$ с от полной остановки РИТ. По найденному t_T , определяется среднее угловое замедление выходного вала МПП за этот промежуток времени: $\varepsilon_{p.t.cp} \approx \frac{\omega_{p.t.max} - \omega_{p.t.min}}{t_T}, c^{-2}$.

Момент торможения РИТ на i -ой передаче МПП и на прямой передаче в согласующем двухступенчатом редукторе ($i_{ред} = 1$): $M_{T,i} = J_p \cdot \varepsilon_{p.t.cp}$, а без учета трения в опорах РИТ $M_{T,i} = (J_p \cdot \varepsilon_{p.t.cp} - M_{сопр})$. Момент трения на валу ОТ (динамический) определяется по формуле: $M_{тр,i} = \frac{J_p \cdot \varepsilon_{p.t.cp} - M_{сопр}}{i_{ред} \cdot \eta}$ [2], где i - текущий номер включенной передачи в МПП; η - к.п.д. согласующего двухступенчатого редуктора; $M_{сопр}$ - момент трения в опорах РИТ (определяется при свободном вращении РИТ):

$$M_{сопр} = \frac{2 \cdot W_k}{\omega_{p.c.max} \cdot t_{o.c.v}} = \frac{J_p \cdot \omega_{p.c.max}}{t_{o.c.v}} = J_p \cdot \varepsilon_{p.c}$$

где W_k - кинетическая энергия, развиваемая при вращении РИТ при работе с $i_{ред} = 1$; $\omega_{p.c.max}$ - максимальная угловая скорость свободного вращения РИТ; $t_{o.c.v}$ - среднее значение времени - среднее значение времени остановки свободного вращения РИТ; $\varepsilon_{p.c} \approx \frac{\omega_{p.c.max} - \omega_{p.c.min}}{t_{o.c.v}}, c^{-2}$ угловое замедление свободного вращения РИТ.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений и сделанных по ним расчетов для определения момента трения в опорах РИТ при свободном вращении представлены в табл. 1.

При $n_{МПП}^{вх} = 1820$ об/мин на четвертой передаче (IV) среднее значение момента трения в опорах РИТ $M_{сопр,cp} = 2,88$ кГм. При $n_{МПП}^{вх} = 2400$ об/мин на третьей передаче (III) среднее значение момента трения в опорах РИТ $M_{сопр,cp} = 2,39$ кГм,

Результаты измерений и сделанных по ним расчетов при торможении РИТ с помощью ОТ с фрикционным материалом СМК-80 и контртелами СЧ18-36/сталь 45X представлены в табл. 2.

Зависимость динамического момента трения ОТ от скоростей скольжения $V_{ск}$ на максимальном радиусе поверхности трения при разных удельных давлениях на диске трения приведена на рис. 3.

Динамический коэффициент трения ОТ подсчитывается по формуле:

$$\mu^2 + \left[5,88 + \frac{32240(p - \sum \Delta p)}{M_{тр}} \right] \mu - 4,6 = 0 \quad [2]$$

Подставляя соответствующие значения $(p - \sum \Delta p)$ и момент трения на валу ОТ (динамический) $M_{тр}$ в зависимости от передачи в МПП в уравнение для динамического коэффициента трения находим коэффициент трения $\mu = \mu_v$. Найденные значения динамического коэффициента трения μ_v для спеченного фрикционного материала СМК-80 и контртел (чугун СЧ 18-36 и сталь 45 X) в зависимости от скоростей скольжения $V_{ск}$ и удельных давлений $p_{уд}$ представлены на рис. 4.

Табл. 1. Определение среднего момента трения $M_{сопр,cp}$ в опорах РИТ

$n_{МПП}^{вх}$, об/мин	№ передачи МПП	№ замедления	$t_{o.p.c.}$, с	$n_{p.c.max}$, об/мин	$\omega_{p.c.}, c^{-1}$		$\varepsilon_{p.c.}, c^{-2}$		$M_{сопр,cp}$, кГм
					$\omega_{p.c.max}$	$\omega_{p.c.min}$	$\varepsilon_{p.c.max}$	$\varepsilon_{p.c}$	
1820	IV	1	20,9	2700	282,6	11,56	12,97	12,8	2,88
		2	21,9	2700	282,6	6,27	12,62		

Примечание: $n_{p.c.max}$ - максимальная частота свободного вращения РИТ; $M_{сопр,cp}$ - среднее значение момента трения в опорах РИТ

Табл. 2. Определение момента трения $M_{тр}$ на валу ОТ

$n_{МПП}^{вх}$, об/мин	№ передачи МПП	n_v , об/мин	t_T , с	$\omega_{p.t.}, c^{-1}$		$\varepsilon_{p.t.}, c^{-2}$			$M_{T,i}$, кГм			$M_{T,i}$, кГм	$M_{тр,i}$, кГм
				max	cp.	max	min	cp.	max	min	cp.		
2400	III	7800	3,49	817	408,5	471	78,5	275	106	17,6	62,5	60,0	214
1820	IV	8400	4,83	880	440,0	310	62,8	186	69,8	14,5	40,8	37,9	135

Примечание: - ротор при торможении связан с МПП через редуктор с $i_{ред} = 0,292$; давление в гидроцилиндре привода включения ОТ $p_{гц} = 0,8$ МПа; угловая скорость РИТ $\omega_{p.t.min} = 0$; $M_{T,i}$ - момент торможения РИТ на i -ой передаче МПП и на прямой передаче в согласующем двухступенчатом редукторе ($i_{ред} = 1$); $M_{T,i}$ - момент торможения без учета трения в опорах РИТ; n_v - частота вращения РИТ в начале торможения; t_T - время торможения

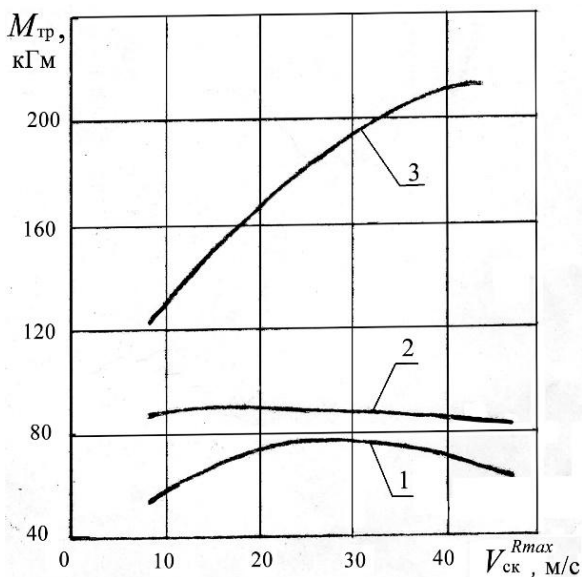


Рис. 3. Зависимость динамического момента трения ОТ от скоростей скольжения $V_{ск}$ на максимальном радиусе поверхности трения и от удельных давлений на диске трения: 1 – $p_{уд} = 0,0108$ МПа; 2 – $p_{уд} = 0,0513$ МПа; 3 – $p_{уд} = 0,136$ МПа

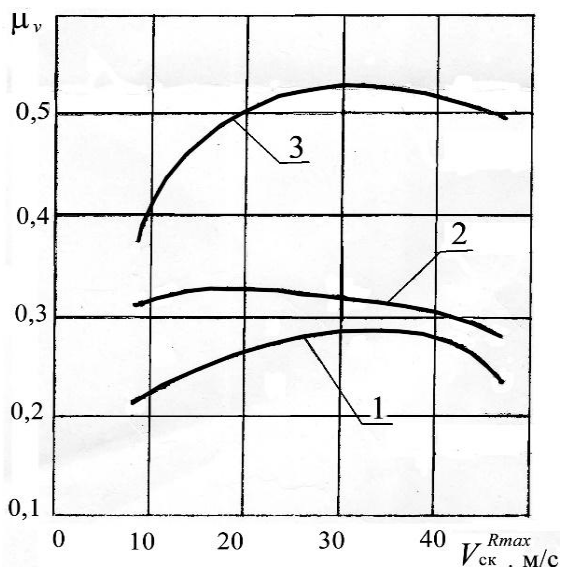


Рис. 4. Зависимость динамического коэффициента трения μ_v ОТ от скоростей скольжения $V_{ск}$ на максимальном радиусе поверхности трения и от удельных давлений на диске трения: 1 – $p_{уд} = 0,136$ МПа; 2 – $p_{уд} = 0,0513$ МПа; 3 – $p_{уд} = 0,0108$ МПа

Момент страгивания (статический) ОТ составляет 450–1600 Н*м при удельном давлении 0,05-0,15 МПа соответственно. При этих же давлениях коэффициент трения статический ОТ составляет 0,25-0,22.

В результатах триботехнических испытаний спеченных фрикционных материалов сухого трения на Fe-основе в ОТ на дизельном инерционном стенде учтены динамические процессы дизельного ДВС, устанавливаемого на транспортную ГМ, в процессе разгона инерционных масс ОТ. [6]

Динамические процессы ДВС влияют на величину динамического момента трения, а соответственно и на величину динамического коэффициента трения.

Заключение

Проведена научно-исследовательская работа с разработкой инерционного стенда с ДВС и с имеющимся на предприятии технологическим оборудованием в виде двухступенчатого редуктора и индукторного тормоза, ротор которого используется в качестве инерционной массы, приходящейся на один борт ГМ, на котором измеряются триботехнические характеристики – динамические момент и коэффициент трения спеченного порошкового фрикционного материала на Fe-основе в ОТ. Результаты работы могут быть использованы в расчетных и исследовательских операциях при проектировании и производстве тормозных устройств трансмиссий легких ГМ с большой удельной мощностью (свыше 30 л.с./Т).

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области по проекту № 19-48-340021.

- [1] Трансмиссии гусеничных и колесных машин /В.М. Труханов и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 736 с.
- [2] Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Методика триботехнических испытаний спеченного фрикционного материала на железной основе в дисковом тормозе на дизельном инерционном стенде// Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 147-151.
- [3] Современные фрикционные материалы /И.М. Федорченко [и др.] – Киев: Наукова думка, 1975. – 334 с.
- [4] Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Спеченные материалы на Fe-основе для фрикционных устройств большой удельной мощности // Трение и износ Гомель ИММС НАН Беларуси, 2020. –Том 41 № 2. – С 180-187.
- [5] Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Разработка технологических основ изготовления, исследование и испытание новых фрикционных изделий сухого трения на основе железа для трансмиссий лёгких гусеничных машин // Вестник машиностроения. – 2020. – № 2. – С. 68-74.
- [6] Шаповалов В.В., Сладковски А., Эркинов А.Ч. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения //Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – №. 1 (658). – С. 64-75.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ ОТ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ АЗОТИРОВАНИЯ

¹Куксенова Л.И. *, ^{1,2}Алексеева М.С., ¹Козлов Д.А.

*E-mail: lkukc@mail.ru

¹Институт Машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, Москва, Россия;

²Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия.

Проанализировано влияние структурного состояния поверхностного слоя сталей разных структурных классов после предварительной обработки и азотирования на уровень износа. Рассмотрены наиболее значимые факторы структуры, влияющие на износостойкость. Обсуждается комплексный параметр износостойкости, включающий характеристики структуры и потерь на износ.

Ключевые слова: стали, поверхностный слой, структура, износ.

Введение

Предварительная обработка сталей и технологические процессы азотирования формируют структуру поверхностного слоя и эксплуатационные свойства изделий. Практика применения азотированных сталей для узлов трения машин и механизмов показала существование связи износостойкости конструкционного материала с его составом и структурой в исходном состоянии, после предварительной обработки (термической или деформационной, а также их сочетания) и последующего химико-термического насыщения поверхности азотом [1]. Поэтому обоснование условий каждого из этапов обработки материала или изделия требует комплексного подхода в виде параметра, учитывающего изменение свойств, которые влияют на характеристики трения и износа. Этот параметр должен включать совокупность макроscopicких и микроскопических характеристик поверхностного слоя, отражающих разные иерархические уровни, и отражать связь параметров технологического процесса азотирования с триботехническими характеристиками.

В докладе приведены результаты экспериментальной оценки характеристик структурного состояния поверхностного слоя сталей после разных условий предварительной обработки и последующего азотирования, и проанализировано

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE WEAR RESISTANCE OF STEELS ON THE STRUCTURAL STATE OF THE SURFACE LAYER AFTER NITRIDING

Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A.

The influence of the structural state of the surface layer of steels of different structural classes after pretreatment and nitriding on the level of wear is analyzed. The most significant structural factors affecting wear resistance are considered. A complex parameter of wear resistance is discussed. It includes the characteristics of the structure and wear.

Keywords: steels, surface layer, structure, wear.

их влияние на уровень поверхностного разрушения при трении.

Материалы и методы исследования

Испытывали сталь 38Х2МЮА перлитного класса, и модельные сплавы на основе железа, легированного Ni, Cr, Al, Ti с аустенитной матрицей. Оценку износостойкости проводили по результатам испытаний по двум схемам. На машине трения МТ-8 с возвратно-поступательным движением плоских сопрягаемых образцов и на машине трения Шкода-Савин при скольжении ролика по плоскости в неактивных смазочных средах. Выявление структурных характеристик поверхностного слоя образцов из сталей и сплавов проводили с помощью металлографического, рентгеноструктурного и электронно-микроскопического методов. Определяли фазовый состав, физическое уширение рентгеновских линий матрицы и нитридов $\beta_{(hkl)}$, отражающее плотность дислокаций и размер частиц упрочняющей фазы, размер и плотность распределения частиц.

Результаты и обсуждение

Применение методов химико-термической обработки сталей позволяет качественно влиять на их свойства. Показателями качества нагруженных является их надежность и долговечность, которые зависят от механических свойств конструкционных материалов (твердости, износостойкости, усталостной прочности), которые, в свою очередь,

определяются их структурно-фазовым состоянием. Поверхностный слой является объектом, с которого начинается разрушение детали в условиях контактной деформации. Поэтому решение проблемы надежности и долговечности пар трения связано с технологическим обеспечением качества их поверхностного слоя, в котором локализуются основные деформационные и физико-химические процессы.

При азотировании поверхностный слой состоит из нитридной фазы и диффузионной зоны с распределенными в ней специальными нитридами (нитридами легирующих элементов). Формирование свойств поверхностного слоя связано с рядом факторов, применение которых позволяет регулировать структурное состояние нитридной фазы и диффузионной зоны. Эти факторы связаны как с технологией насыщения поверхности, так и свойствами обрабатываемого металла.

Последовательно рассмотрим роль двух факторов: первичную термическую обработку сталей и их тип структуры. Послойные исследования с помощью рентгеновского анализа и просвечивающей электронной микроскопии показали, что при разных температурах предварительного отпуска и азотирования фазовый состав слоя изменяется по глубине в последовательности: оксиды Fe_3O_4 ; ϵ -фаза; смесь ϵ и γ' - фаза в виде пластинчатых образований; γ' - фаза с прослойками ϵ -фазы; ОЦК α -Fe с дисперсными включениями специальных нитридов. Каждая структурная составляющая обладает разной износостойкостью. Слой оксидов после быстро разрушается (интенсивность изнашивания ($I_h \sim 10^{-8}$), обеспечивая приработку пары трения. Зона, в которой находится наибольшее количество частиц ϵ -фазы ($Fe_{2,3}N$), обладает высокой износостойкостью ($I_h \sim 10^{-11}$) и имеет самый большой путь трения до разрушения. Интенсивность изнашивания α -Fe имеет значения, характерные для работоспособных азотированных узлов трения машин ($I_h \sim 10^{-9}$). В табл.1 приведены твердость α -Fe и ϵ -фазы и физическое уширение рентгеновских линий β_{hkl} этих фаз в зависимости от температуры предварительного отпуска

При повышении температуры $\beta_{(hkl)}$ α -Fe фазы уменьшается, что вызвано снижением уровня микродеформации кристаллической решетки вследствие формирования некогерентных частиц упрочняющей фазы [2]); β_{hkl} ϵ -фазы, наоборот, растет в результате уменьшения в два раза размера кристаллов: от 50 нм при $t_{отп} = 500$ °C до 25 нм при $t_{отп} = 650$ °C. По данным [3,4] изменяется также

размер частиц специальных нитридов и их распределение в диффузионной зоне. С повышением температуры отпуска снижается их средний размер при температуре отпуска 500 °C (по сравнению с закаленным состоянием) и далее растет; количество нитридов обратно пропорционально размеру. Установлено, что нитридные частицы размером ~ 10 нм ($t_{отп} > 600$ °C) соответствует их некогерентному с матрицей состоянию. Следовательно, создаются условия повышения износостойкости стали в результате двух структурных превращений: 1 - уменьшения уровня микродеформации кристаллической решетки (при когерентных нитридах величина микроискажений составляет $\sim 10,3 \cdot 10^{-3}$, при некогерентных частицах она в 2,5 раза меньше и составляет $\sim 3,9 \cdot 10^{-3}$); 2 - увеличения доли некогерентных частиц упрочняющей фазы и формирования нанокристаллического состояния поверхностной фазы нитридов железа.

Табл. 1. Характеристики азотированного слоя

Температура отпуска, t °C	Твердость HV, МПа		$\beta_{(hkl)}$ α -Fe, мрад.	$\beta_{(hkl)}$ ϵ -фазы, мрад.
	ϵ -фаза	α -Fe + нитриды		
500	5850	10 000	31,5	6,5
550	5900	9 250	24,0	10,5
600	5850	9 000	21,5	12,5
650	5900	8900	20,0	14,0

Таким образом, представленные результаты дают основание рассматривать составляющую технологии процесса азотирования (предварительную термическую обработку) сталей в качестве фактора управления износостойкостью азотированного слоя за счет направленного воздействия на формирование тонкой структуры твердого раствора на основе железа для образования нитридных частиц заданного размера и плотности их распределения, а также слоя нитридов железа, прилегающего к свободной поверхности.

Основной структурной составляющей азотируемых сталей является фазы α -Fe(ОЦК-решетка) или γ -Fe(ГЦК-решетка). В табл. 2 приведены основные экспериментальные данные, иллюстрирующие связь структуры и износостойкости азотируемых стали и сплавов с разными решетками матрицы.

В сплавах с α -матрицей с уменьшением твердости и значений $\beta_{(hkl)}$ относительная износостойкость увеличивается, имеет максимум после азотирования при 620 °C. Связано это с тем, что при повышении температуры азотирования

происходит увеличение размера частиц специальных нитридов, уменьшение их плотности распределения и потеря когерентности с матрицей. Это приводит к снижению микродеформации кристаллической решетки α -твердого раствора, увеличению запаса пластичности диффузионной зоны и, как следствие, повышению износостойкости.

Табл. 2. Характеристики структуры и износа

Температура азотирования, °С	$\beta_{(hkl)}$, мрад	HV, МПа	$I_{отн}$
540	21	7000	1,2
580	20	6500	2,0
620	18	5200	2,5
660	16	4000	1,8
700	15	3300	1,0
Сплавы с γ -матрицей			
Fe-Ni	10	2200	0,4
Fe-Ni-Al	30	5800	1,0
Fe-Ni-Cr	35	7000	1,2
Fe-Ni-Ti	50	8300	1,5

В сплавах с γ - матрицей для всех температур азотирования наблюдается прямая корреляция между твердостью, износостойкостью и физическим уширением линий. Она связана с особенностями формирования структуры диффузионного слоя: в сплавах с γ -матрицей по мере повышения температуры азотирования формируются нестабильные зародыши нитридных фаз, когерентные матрице, изменяется их состав, и происходит только частичное нарушение когерентности. Стадии формирования структуры азотированного слоя определяются природой легирующих элементов, матрицы и нитридов. Высокий уровень микродеформации кристаллической решетки матрицы, вызванной некогерентными границами матрица-нитрид, вызывает повышение уровня поверхностного разрушения.

В целом, исследование зависимости износостойкости сталей разных структурных классов показало, что для разных температур предварительной обработки и последующего азотирования наиболее значимыми характеристиками структурного состояния и свойств поверхностных слоев, которые влияют на износостойкость, являются размер частиц нитридов, плотность распределения специальных нитридов, микродеформация кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения

рентгеновских линий азотированного твердого раствора, твердость слоя, запас пластичности (деформационной способности при контактной деформации). На основе выявленных значимых факторов разработано соотношение, связывающее структурные характеристики азотированного слоя с износостойкостью сталей и сплавов. Для этого использовали методологию разработки безразмерного физико-механического комплекса, позволяющего оценивать износ цементованных деталей [5]. Применительно к азотированному диффузионному слою разработанное нами выражение имеет вид:

$$K_{аз} = \frac{\left[H_0 + k_1 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^{1/2} \right]^{1.75} [DvA(\beta_{кр}^2 - \beta_0^2)]^2}{\left(k_2 + \frac{d}{\delta} C_y \right)^2},$$

где H_0 – твердость стали до азотирования; $\frac{\Delta d}{d}$ – микродеформация кристаллической решетки матрицы; D – средний размер блоков мозаики; v – вектор Бюргерса; d – размер зоны сдвига при деформации; δ – размер частиц упрочняющей фазы; C_y – концентрация частиц упрочняющей фазы, при этом $C_y = \pi \delta^2 / L^2$, где L – расстояние между частицами, определяемое методом просвечивающей электронной микроскопии; k_1, k_2 – постоянные, отражающие изменение твердости сталей и геометрические характеристики дислокационных петель соответственно; β_0 и $\beta_{кр}$ – начальное и критическое значения физического уширения соответственно.

На рис. 1 представлена зависимость относительной износостойкости сталей от величины структурно-механического критерия. Эта зависимость, на которой приведены данные множества экспериментальных исследований [1], является линейной. Величина относительной износостойкости сталей и сплавов соответствует диапазону 0,9-4,5, при этом параметр $K_{аз}$ принимает значения от $0,1 \cdot 10^5$ до $0,9 \cdot 10^5$. Крайние величины соответствуют сплаву Fe + 29%Ni + 4%(Cr, Al, Ti), ГЦК-решетка, при температуре азотирования 500-620 °С и стали 38Х2МЮА, ОЦК-решетка, при температуре азотирования 620 °С. Особенностью этого параметра является возможность по заданному в эксплуатации уровню допустимого износа через совокупность характеристик структуры назначать режимы азотирования для деталей пар трения.

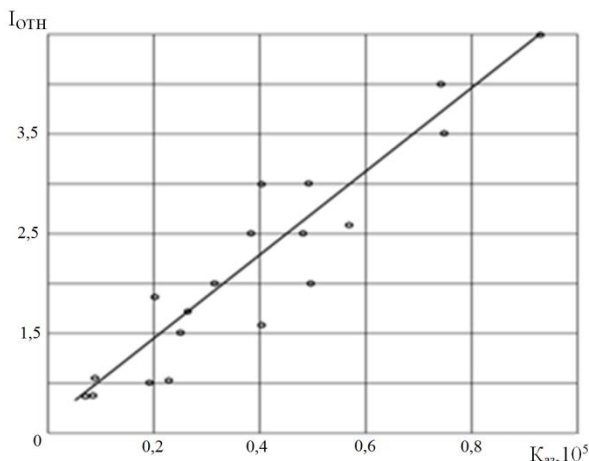


Рис. 1. Взаимосвязь относительной износостойкости и физико-механического параметра

Заключение

При азотировании деталей узлов трения необходимо рассматривать не только параметры технологического процесса, но и условия предварительной обработки, а также тип структуры стали. В процессе азотирования создаются две зоны модифицированного слоя: поверхностный нитридный слой и подповерхностный слой – диффузионную зону, каждая из которых по разным механизмам влияет на уровень поверхностного разрушения деталей.

Нитридный слой, состоящий из ϵ -нитридов (Fe_{2-3}N), значительно увеличивает долговечность пары трения. Интенсивность изнашивания слоя нитридов в несколько ниже, чем диффузионной зоны, благодаря нанокристаллическому состоянию ϵ -фазы.

Предварительная термическая обработка является фактором направленного воздействия на формирование тонкой структуры твердого раствора на основе железа для образования нитридных частиц заданного размера и плотности их распределения, а также слоя нитридов железа, прилегающего к свободной поверхности.

Анализ закономерностей изменения структуры диффузионной зоны азотированных сталей перлитного и аустенитного классов (с ОЦК и ГЦК решетками матрицы) и относительной износостойкости в зависимости от их состава и температуры азотирования показал, что максимальной износостойкостью обладает азотированный слой с низким уровнем микродеформации кристаллической решетки матрицы в результате формирования в ней некогерентных специальных нитридов.

Установлены характеристики структуры азотированного слоя, наиболее существенно влияющие на износостойкость сталей: это размер частиц нитридов, плотность распределения специальных нитридов, микродеформация кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий азотированного твердого раствора, твердость слоя, запас пластичности.

На основе наиболее значащих факторов структуры разработан физико-механический параметр оценки свойств и состояния поверхностных слоев, который позволяет значительно сократить и упростить цикл установления оптимальной технологии для деталей триботехнического назначения.

- [1] Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов / С.А. Герасимов, Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 518 с.
- [2] Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г., Алексеева М.С. Физические основы критериальной оценки технологии азотирования деталей узлов трения // *МиТОМ*. – 2012. – № 12. – С. 39-47.
- [3] Жихарев А.В. Научное обоснование и разработка технологии предварительной обработки конструкционных азотируемых сталей / Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 16 с.
- [4] Мичугина М.С. Разработка структурного состояния азотированного слоя конструкционных сталей, ответственного за их износостойкость / Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МАИ (Государственный технический университет), 2008. – 16 с.
- [5] Дроздов Ю.Н., Рыбакова Л.М., Литвинов И.П., Павлик Б.Б., Сидоров С.А. Кинетика разрушения конструкционных сталей при трении // *Трение и износ*. – 1989. – № 5. – С.773-778.

СЦЕПЛЕНИЕ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ЧАСТИЧНОМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИИ

Любичева А.Н. *, Цуканов И.Ю.

*E-mail: lyubicheva@mail.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

Улучшения функциональных характеристик материалов можно добиться с помощью создания текстуры. При обеспечении сцепления поверхностей, повышения износостойкости и удержания смазки в зоне контакта для различных узлов трения текстурированные поверхности играют важную роль [1, 2]. В работе представлен сравнительный анализ моделей для упругой полуплоскости и упругого основания с нормальной и касательной податливостью. Проведен анализ возможности использования упрощенной модели для расчета сцепления текстурированных поверхностей.

Ключевые слова: текстура поверхности, частичное проскальзывание, упругое полупространство и основание.

Введение

Текстурированные поверхности играют важную роль в обеспечении необходимых фрикционно-износных характеристик различных узлов трения. Одной из областей применения таких поверхностей является противоскользкие поверхности, работающие в условиях трения покоя. Чаще всего, такие поверхности являются жесткими, а в качестве контртела выступает более мягкий эластичный материал. В то же время, существуют сопряжения поверхностей с материалами, имеющими близкие значения упругих свойств, как например, в паре, где обе поверхности выполнены из древесины. Обзор работ, посвященных аналитическим моделям для исследования взаимодействия упругих тел в условиях частичного проскальзывания в случае регулярной текстуры, представлен в [3].

В настоящей работе исследуется влияние текстуры поверхности, описываемой синусоидальной функцией степени $2n$, на ее сцепление с упругой полуплоскостью.

Постановка задачи

Рассмотрено контактное взаимодействие упругой полуплоскости с текстурированной поверхностью, форма которой представлена функцией (1). К выступу на каждом периоде текстуры, приложены нормальная P и касательная Q

STICKINESS OF TEXTURED SURFACES IN PARTIAL SLIP

Lyubicheva A.N., Tsukanov I.Yu.

Improving the functional characteristics of the surfaces of materials can be achieved by texturing. Textured surfaces play an important role in ensuring adhesion of surfaces, increasing wear resistance, and retaining lubricant in the contact zone for various friction units [1, 2]. The paper presents a comparative analysis of models for an elastic half-plane and an elastic foundation with normal and tangential compliance. The analysis permits to estimate limits for using a simplified model for calculating the stickiness of textured surfaces.

Keywords: surface texture, partial slip, elastic halfspace and foundation.

нагрузки (рис. 1), при этом соблюдается следующая последовательность: сначала происходит воздействие нормальной, а затем касательной силы.

$$f(x) = A \sin^{2n} \left(\frac{\pi x}{L} \right), \quad (1)$$

здесь A – высота профиля; L – расстояние между впадинами; n – параметр, задающий радиус кривизны впадины; $n \in \mathbb{N}^*$.

Необходимо определить давление на поверхности и касательные напряжения в области контакта.

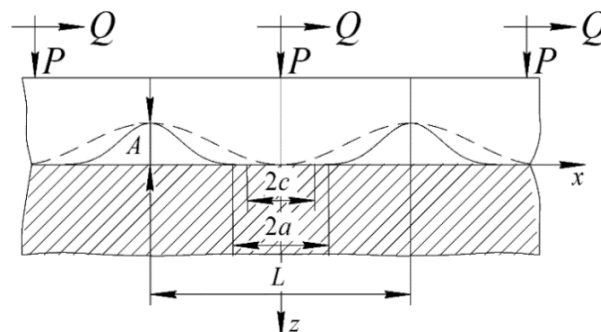


Рис. 1. Схема контакта текстурированной поверхности и полуплоскости: сплошная линия $n = 4$; штриховая $n = 1$

Упругое полупространство

Вначале рассмотрим контакт двух полуплоскостей, которые представляют собой

линейно упругие тела, описываемые модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν , в рамках теории плоского деформированного состояния. Для применимости уравнений линейной теории упругости необходимо, чтобы амплитуда текстуры была значительно меньше периода $A \ll L$.

При приложении касательной силы в зоне контакта возникают силы трения. По краям области контакта будут возникать зоны проскальзывания, при этом в центре зоны контакта шириной $2a$ будет присутствовать область сцепления шириной $2c$ (см. рис. 1). Области проскальзывания шириной b слева и справа от границы зоны сцепления будут одинаковыми, поскольку граничные условия симметричны. Сила трения в зоне проскальзывания согласно закону Амонтона:

$$q(x) = -\mu p(x), \quad c \leq |x| \leq a, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения, $p(x)$ – контактное давление.

В результате решения задачи с применением метода Каттанео и Миндлина [4, 5] получено выражение для касательных усилий в области сцепления:

$$\frac{Q}{\mu P} = 1 - \left(\frac{\sin^2\left(\frac{\pi c}{L}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi a}{L}\right)} \right)^n. \quad (3)$$

Упругое основание

Применим для решения этой же задачи модель упругого основания, обладающего нормальной и касательной податливостью, и будем считать текстурированное контртело недеформируемым. В этом случае удастся избежать ограничения на величину высоты профиля и провести анализ перехода от частичного проскальзывания к полному скольжению для развитого рельефа.

Горизонтальные $u_x(x)$ и вертикальные $u_z(x)$ перемещения основания связаны с горизонтальными $p_x(x)$ и вертикальными $p_z(x)$ усилиями соотношениями:

$$p_x(x) = k_x u_x(x); \quad p_z(x) = k_z u_z(x). \quad (4)$$

Сравнительный анализ решений, полученных по модели упругой полуплоскости и упругого основания для малых амплитуд профиля, дает возможность подобрать оптимальные характеристики основания k_x/k_z .

Отношения касательной и нормальной нагрузок $Q/\mu P$ и размеров областей сцепления и контакта c/a вычисляется с помощью итерационной

процедуры при различных параметрах текстуры и нагрузочных режимах.

Результаты и обсуждение

В результате расчетов были получены зависимости контактных давлений и касательных усилий для обеих моделей, проведен выбор параметров модели основания по критерию совпадения величины нагрузки при полном контакте поверхностей для различных показателей степени n функции (1).

На рис. 2 представлены распределения безразмерных касательных усилий $q(x)/p^*$ при $Q/\mu P = 0.5$.

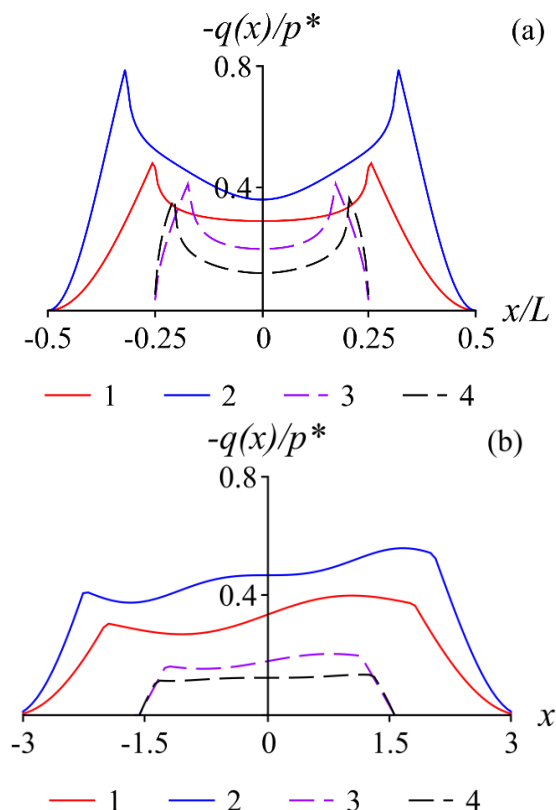


Рис. 2. Распределения безразмерных касательных усилий: упругая полуплоскость (а); модель основания (б); при $n = 1$ (кривые 1, 3); при $n = 2$ (кривые 2, 4); при $2a = 0.5L$ (кривые 3, 4), при $2a = L$ (кривые 1, 2)

Распределения касательных усилий, показанные на рис. 2, а, имеют характерный вид с максимумами по краям зоны сцепления. Эффект взаимного влияния приводит к увеличению максимальных касательных усилий с ростом нормальной нагрузки (размера области контакта), а также с ростом степени n . Распределение безразмерных касательных усилий для модели упругого основания представлено на рис. 2, б. Характер этих кривых существенно отличается от распределения касательных усилий для упругой полуплоскости (см. рис. 2, а). Границы областей проскальзывания в данном случае несимметричны

относительно начала координат. Область проскальзывания, расположенная слева от начала координат, больше области проскальзывания, расположенной справа, вследствие того, что в модели упругого основания приближенно учитывается кривизна профиля с помощью разложения вертикальной и горизонтальной сил на нормальную и касательную. При этом допущение $A \ll L$ может не выполняться.

На рис. 3 приведены графики отношения касательной нагрузки к нормальной $Q/\mu P$ в зависимости от отношения размера зоны сцепления c к размеру области контакта a для двух моделей при $A = 0.1$.

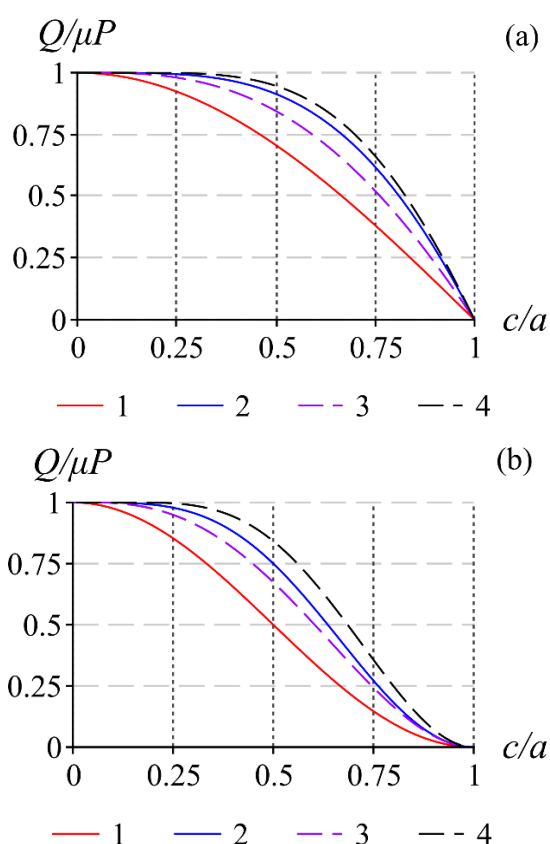


Рис. 2. Зависимость величины $Q/\mu P$ от отношения c/a при $2a = L/2$ (а) и при $2a = L$ (б); упругая полуплоскость (кривые 1, 2); модель основания (кривые 3, 4); при $n = 1$ (кривые 1, 3); при $n = 2$ (кривые 2, 4)

Графики показывают, что в условиях неполного контакта (см. рис. 3, а) область проскальзывания растет медленно при малых касательных усилиях и быстро при значительных. С увеличением степени n рост области проскальзывания снижается, особенно при высоких значениях Q . При переходе к полному контакту

уменьшается участок медленного роста зоны проскальзывания с увеличением касательной нагрузки для всех n (см. рис 3, б). При очень высоких значениях n характер кривых соответствует решению для системы плоских штампов.

Заключение

В работе проведен анализ контакта упругого тела с двумерной текстурированной поверхностью, описываемой функцией синуса, возведенного в четную степень в рамках моделей сплошной среды и модели основания, обладающей касательной жесткостью. Получены аналитические выражения для расчета нормальных и касательных усилий, размера области контакта, а также размеров областей сцепления и проскальзывания.

Установлено, что границы областей проскальзывания для модели упругого основания несимметричны относительно начала координат, вследствие того, что приближенно учитывается кривизна профиля с помощью разложения вертикальной и горизонтальной сил на нормальную и касательную компоненты. Модель упругого основания показала хорошее совпадение кривых $P - a$ с решением для упругой полуплоскости для всех значений n ; при этом с ростом n результаты для двух моделей сближаются. Ширина области сцепления c немонотонно зависит от высоты рельефа A , что ярче проявляется в случае полного контакта. Максимальное значение области проскальзывания с ростом степени n локализуется в области меньших значений высоты профиля, чем в случае синусоидальной текстуры ($n = 1$).

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4).

- [1] Venci A., Ivanović L., Stojanović B., Zadorozhnaya E., Miladinović S., Svoboda P. Surface texturing for tribological applications: a review // Proc. Eng. Sci. – 2019. – V 1. – P. 227.
- [2] Lu P., Wood R.J.K. Tribological performance of surface texturing in mechanical applications – a review // Surf. Topogr.: Metrol. Prop. – 2020. – V. 8. – 043001.
- [3] Горячева И.Г., Цуканов И.Ю. Развитие механики дискретного контакта с приложениями к исследованию фрикционного взаимодействия деформируемых тел // ПММ. – 2020. – Т. 4. – С. 757.
- [4] Cattaneo C. Sul contatto di due corpi elastici: distribuzione locale degli sforzi // Rendiconti dell'Accademia Nazionale dei Lincei. – 1938. – V. 27. – P. 342.
- [5] Mindlin R.D. Compliance of elastic bodies in contact // J. Appl. Mech. T-ASME. – 1949. – V. 16. – P. 259.

ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА АКТИВАЦИИ ТРЕНИЯ ЛОКОМОТИВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Майба И.А.

E-mail: mia@rgups.ru

ФГБОУ ВО РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия.

Представлены результаты исследований устройства активации трения локомотивов УАТЛ на устойчивость к внешним климатическим и механическим факторам, в том числе испытания на механические воздействия (на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам), испытания на климатические воздействия (на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам), испытание на теплостойкость (на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации), испытание на холодостойкость (на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации). Проверка проводится после воздействия внешних механических воздействий по принципу проверки функционирования с использованием пневматической схемы.

Ключевые слова: испытания, устройство активации трения, внешние механические воздействия, напряжения, проверка правильности функционирования.

Введение

Одним из вопросов, ограничивающих возможности реализации концепции организации ремонта локомотивов в условиях технологии управления тяговыми ресурсами на полигоне, является внеплановый заход локомотивов на экипировку песком с отцепом поезда. Актуальной задачей совершенствования эксплуатационной работы локомотивов является разработка устройств (систем), увеличивающих периодичность заправки локомотивов песком. К таким устройствам относятся системы стабилизации тягового усилия локомотивов (далее – системы УАТЛ), которые являются перспективным средством повышения сцепных свойств локомотивов в тяжеловесном движении [1-3].

Применение системы УАТЛ обеспечивает повышение сцепных свойств локомотива, устойчивую реализацию силы тяги по сцеплению, исключение боксования с эффектом полного исключения или снижения применения песка не менее чем на 80%. Применение систем УАТЛ

TESTING OF THE LOCOMOTIVE FRICTION ACTIVATION DEVICE FOR RESISTANCE TO EXTERNAL CLIMATIC AND MECHANICAL FACTORS

Maiba I.A.

The results of studies of the friction activation device of UATL locomotives for resistance to external mechanical factors, including tests for mechanical effects (for resistance to mechanical external factors), tests for climatic effects (for resistance to climatic external factors), heat resistance test (for the effect of the upper value of the ambient temperature during operation), cold resistance test (for the effect of the lower value of the ambient temperature during operation) are presented.. The check is carried out after exposure to external mechanical influences according to the principle of checking the operation using a pneumatic circuit).

Keywords: tests, friction activation device, external mechanical influences, stresses, operability check.

повлияет на натуральные показатели работы локомотива при изменении организации экипировки локомотивов в условиях полигонного движения. Снижение плановых и внеплановых заходов локомотива на экипировку песком с отцепом и без отцепа поезда, при использовании систем УАТЛ, позволит увеличить среднегодовой пробег локомотивов (Δl) при одновременном исключении или снижении расхода песка не менее 80%, и отказаться от строительства дополнительных пунктов экипировки песком на сети железных дорог ОАО «РЖД».

В данной работе рассмотрены результаты исследований по проведению приемочных испытаний устройств УАТЛ на устойчивость оборудования устройства УАТЛ к внешним климатическим и механическим факторам.

Цели и задачи исследования

Определение соответствия характеристик УАТЛ требованиям конструкторской документации — технического задания УАТЛ.303381.000Т3 (далее – ТЗ), программе и методике приемочных

испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам УАТЛ.303381.010ПМ1 (далее — ПМ1), Программе и методике приемочных испытаний на устойчивость к воздействию внешних механических факторов УАТЛ.303381.010ПМ2 (далее – ПМ2).

Материалы и методы

Объектом испытания является устройство активации трения локомотива, конструкторская документация +УАТЛ.303381.010 (далее - КД), обеспечивающее повышение сцепных свойств локомотива с эффектом полного исключения или снижения применения песка.

Как известно, наибольшее влияние на надежность узлов и деталей локомотивов оказывают окружающая эксплуатационная среда, режимы работы, нагрузки и механические воздействия на узлы и детали. В связи с чем программы и методики испытаний устройства УАТЛ предусматривают проведение не только эксплуатационных испытаний, но и проведение стендовых испытаний на устойчивость оборудования устройства УАТЛ к внешним климатическим и механическим факторам.

Испытания локомотива, оборудованного устройствами активации трения, проводятся в соответствии с ГОСТ 15.902 (далее– Стандарт 1) по согласованным программам и методикам испытаний. При формировании программы и методики стендовых испытаний необходимо учитывать требования, изложенные в ГОСТ 30631-99 (далее – Стандарт 2) по определению групп механического исполнения оборудования устройства УАТЛ. Стандартом 2 в зависимости от места установки оборудования на локомотиве устанавливаются индивидуальные требования к испытаниям на устойчивость к механическим внешним воздействиям.

Соблюдение требований вышеуказанных стандартов при разработке нового изделия для локомотива предполагает индивидуальный подход к формированию программы и методики испытаний изделия, требований к испытываемым показателям. Исследование этого вопроса и решение задач методической подготовки процесса испытаний является весьма актуальной задачей, так как от корректности составленной программы испытаний зависит надежность изделия в эксплуатации и безопасность его применения.

Специфика размещения оборудования УАТЛ заключается в том, что панели управления устанавливаются в кузове локомотива, а пневматическое и механическое оборудование размещено на раме локомотива. То есть, панели

управления УАТЛ относятся к группе М25, как оборудование в кузовах и под кузовами локомотивов, а пневмопривод и крепление пневмопривода УАТЛ расположенного на раме локомотива относятся к группе М26, обрессоренного оборудования, установленного на тележках. При этом испытания на устойчивость к воздействию внешних механических факторов должны подтвердить, что оборудование УАТЛ, установленное на локомотиве должно сохранять свои параметры на протяжении всего периода эксплуатации в пределах норм, установленных в технической документации и норм межремонтного технического обслуживания.

Программа испытаний включает:

1. Испытания на механические воздействия (на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам).

2. Испытания на климатические воздействия (на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам).

2.1 Испытание на теплостойкость (на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации).

2.2 Испытание на холодостойкость (на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации).

Испытания проводили в ИЦ ТСЖТ ОАО «ВЭЛНИИ» на испытательной станции отдела электрических аппаратов с использованием вибростенда отдела динамики и прочности при температуре окружающей среды от плюс 17 °С до плюс 19 °С, относительной влажности воздуха от 45% до 47 %, атмосферном давлении от 98,5 до 101,1 кПа. Методы испытаний согласно ГОСТ 30630.1.1-99, ГОСТ 30630.1.2-99, ГОСТ 30630.2.1-2013, ПМ1, ПМ2.

Испытания на механические воздействия (на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам) на соответствие группе механического исполнения №М26 по ГОСТ 30631-99.

В ходе проведения испытаний проводилась проверка исправности и работоспособности УАТЛ по ПМ2 в нормальных климатических условиях в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

Проводилась проверка усилия нажатия, создаваемого пневмоцилиндром и проверка герметичности пневмоцилиндра при воздействии климатических и механических факторов.

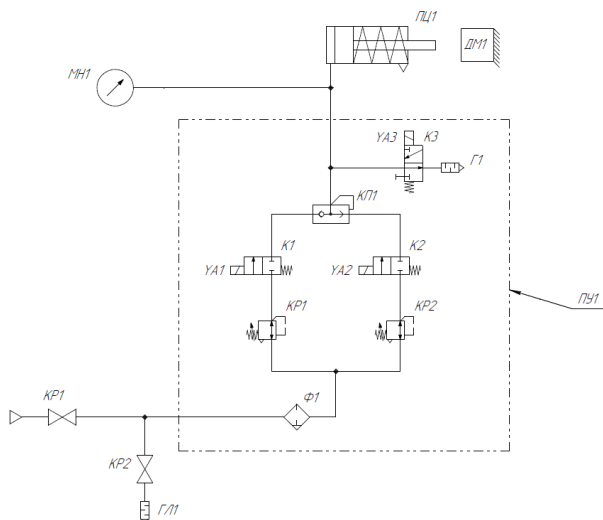


Рис. 1. Принципиальная схема испытываемого устройства УАТЛ
ЩЦ1 – привод колодки; ПУ1 – панель управления;
МН1 – манометр; КП1, КП2 – кран; ГЛ1 – глушитель;
ДМ1 – динамометр.

Результаты и обсуждение

Испытаниями подтверждается исправность УАТЛ. Работоспособность и герметичность соответствуют требованиям ПМ2. Испытания на обнаружение резонансных частот проводили по методу 100-1 ГОСТ 30630.1.1-99 при воздействии вибрации в эксплуатационном положении без электрической нагрузки. Резонансные частоты не обнаружены во всём диапазоне частот.

Испытания на вибропрочность проводили путем воздействия вибрации в вертикальном и горизонтальном направлении по методу 103-2.1 ГОСТ 30630.1.2-99 на фиксированных частотах 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100 Гц без электрической нагрузки. Длительность испытаний 6 ч, амплитуда виброускорения 30 м/с. После испытаний визуально осмотрели и убедились в сохранности внешнего вида УАТЛ и отсутствии ослаблений креплений.

Пневматический блок устройства активации трения локомотивов УАТЛ.303381.010 соответствует требованиям ГОСТ 30631-99, группа механического исполнения М26.

Испытание на теплостойкость (на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации) УАТЛ проводили в климатической камере ВЕОСАМ ТСН-30К (далее — камера) при температуре окружающей среды плюс 60 °С по ГОСТ 30630.2.1-2013 (метод 201-2.1).

Испытаниями подтверждается исправность УАТЛ. Работоспособность и герметичность соответствуют требованиям ПМ1.

Испытание на холодостойкость (на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации).

Испытание на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации (холодостойкость) УАТЛ проводили в камере по ГОСТ 30630.2.1-2013 (метод 203-1).

После проверки работоспособности провели проверку герметичности УАТЛ.

Испытаниями подтверждается исправность УАТЛ. Работоспособность и герметичность соответствуют требованиям ПМ1.

Заключение

Представленный в работе материал в области исследований, направленных на разработку методики и программы испытаний устройства УАТЛ на устойчивость к воздействию внешних механических факторов, позволяет корректно проводить испытания и получать результаты, которые в случае подтверждения соответствия требованиям технической документации на устройство УАТЛ, обеспечивают надежность работы оборудования в эксплуатации с заданной наработкой на отказ.

Проведенными испытаниями подтверждается соответствие характеристик устройства активации трения локомотивов УАТЛ.303381.010, требованиям конструкторской документации — технического задания УАТЛ.303381.000ТЗ, программе и методике приемочных испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам УАТЛ.303381.010ПМ1, а также программе и методике приемочных испытаний на устойчивость к воздействию внешних механических факторов УАТЛ.303381.010ПМ2.

[1] Kokhanovskii V. A. et al. Lubricator casings for locomotive wheel rims //Russian Engineering Research. – 2016. – Т. 36. – №. 5. – С. 364-365.

[2] Bergmann E. et al. Friction properties of sputtered dichalcogenide layers // Tribology international. – 1981. – Т. 14. – №. 6. – С. 329-332.

[3] Mouginsteine L. Technical and Economical Problems of Locomotive Wheelsets Adhesion with Rail. // Proceedings of INHA'99 STS-Conference on Wheel/Rail Interface, 1999. – №1. – С. 307-311.

КОРРЕКЦИЯ В МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЕ ОТКРЫВАНИЯ ДНИЩА КОВША ЭКСКАВАТОРА

Малафеев С.И. *, Малафеева А.А.

*E-mail: simalafeev@gmail.com

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия.

Электропривод открывания днища ковша экскаватора предназначен для выдергивания засова при разгрузке породы. В электроприводе постоянного тока с обратной связью по напряжению установлено задание частоты вращения, равной номинальной частоте электродвигателя, а в управляемом блоке ограничения тока установлено ограничение, соответствующее току подтягивания троса. При действии сигнала на разгрузку ковша в блоке ограничения тока устанавливается ограничение тока, соответствующее моменту, превышающему приведенному моменту силы трения в механизме засова. После выдергивания засова происходит снижение тока электродвигателя. В блоке ограничения тока устанавливается ограничение, соответствующее режиму подтягивания троса.

Ключевые слова: экскаватор, электропривод, трение, двигатель, управление, обратная связь.

Введение

На горных предприятиях основной машиной в технологическом процессе добычи полезных ископаемых является экскаватор [1-4]. Электрический привод открывания днища ковша (ОДК) одноковшового экскаватора-мехлопаты предназначен для выдергивания засова из отверстия в пяте передней стенки ковша при выгрузке породы по команде машиниста [5, 6]. Возврат днища ковша в исходное положение и его запираение засовом происходят автоматически после выгрузки породы при опускании ковша из положения разгрузки в положение черпания. Во всех режимах работы экскаватора, кроме разгрузки, электропривод ОДК создает постоянное небольшое натяжение троса, прикрепленного к механизму засова. При выдергивании засова электропривод ОДК должен создавать усилие, достаточное для преодоления нагрузки в механизме засова [5-8].

Нагрузка привода ОДК – сухое трение в механизме засова. В каждом цикле сила трения принимает случайное значение. Основное требование к приводу – надежное выдергивание засова при минимальных потерях в двигателе.

CORRECTION IN THE MECHATRONIC SYSTEM OF OPENING THE EXCAVATOR BUCKET BOTTOM

Malafeev S.I., Malafeeva A.A.

The electric drive for opening the bottom of the excavator bucket is designed to pull the bolt when unloading the rock. In a DC electric drive with voltage feedback, the setting of the rotation frequency equal to the rated frequency of the electric motor is set, and in the controlled current limitation unit, a restriction corresponding to the cable pull-up current is set. When a signal is applied to unload the bucket, a current limitation is set in the current limitation unit corresponding to a moment exceeding the reduced of the torque friction force in the deadbolt mechanism. After pulling the bolt, the current of the electric motor decreases. In the current limitation unit, a restriction corresponding to the cable tightening mode is set.

Keywords: excavator, electric drive, friction, motor, control, feedback.

В настоящее время на карьерных электрических экскаваторах типа «прямая лопата» для открывания днища ковша используются электроприводы постоянного и переменного тока [6-8]. На российских карьерных экскаваторах используются преимущественно электроприводы постоянного тока с обратной связью по току. Моменты подтягивания троса и выдергивания защелки задаются двумя уставками якорного тока двигателя. При случайной величине силы трения и стабилизированном токе двигателя выдергивание защелки не гарантируется при первом нажатии кнопки управления машинистом. Повторное включение вызывает дополнительный нагрев двигателя. В связи с этим представляет интерес разработка специальных алгоритмов управления.

Цели и задачи исследования

Анализ и моделирование процессов в приводе ОДК с коррекцией процессов при выдергивании засова.

Анализ нагрузок привода ОДК

Сила трения при выдергивании засова при горизонтальном положении днища при разгрузке определяется по приближенной формуле [8]

$$F_{\text{тр}} \approx \frac{1}{2} k_{\text{тр}} (m_{\text{п}} + m_{\text{д}}) g,$$

где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; $m_{\text{п}}$ – масса породы в ковше; $m_{\text{д}}$ – масса днища ковша; g – ускорение свободного падения.

Приведенный к валу двигателя статический момент нагрузки равен

$$M_{\text{пр}} = k_{\text{д}} k_{\text{р}} k_{\text{к}} F_{\text{тр}},$$

где $k_{\text{д}}$, $k_{\text{р}}$, и $k_{\text{к}}$ – коэффициенты передачи соответственно лебедки, рычагов на рукояти и рычага на днище ковша.

Коэффициент передачи лебедки равен

$$k_{\text{д}} = \frac{D + d}{2},$$

где D – диаметр барабана; d – диаметр каната.

Момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя, определяется по формуле

$$J_{\text{пр}} = (k_{\text{д}} k_{\text{р}} k_{\text{к}})^2 m_3,$$

где m_3 – масса засова.

Засов при выдергивании движется с ускорением, которое пропорционально разности силы тяги $F_{\text{т}}$ и силы трения $F_{\text{тр}}$. Эта разность и время выдергивания засова t_3 связаны соотношением

$$\Delta F = F_{\text{т}} - F_{\text{тр}} = \frac{2m_3 l}{t_3^2},$$

где l – ход засова.

Момент нагрузки, приведенный к валу двигателя, при выдергивании засова равен сумме статического момента сопротивления движению и динамического момента, пропорционального ускорению,

$$M = M_{\text{пр}} + J_{\text{пр}} \dot{\Omega} = k_{\text{д}} k_{\text{р}} k_{\text{к}} F_{\text{тр}} + k_{\text{д}} k_{\text{р}} k_{\text{к}} \Delta F,$$

где $\dot{\Omega}$ – угловое ускорение двигателя.

Механическая мощность при выдергивании засова равна

$$P_6 = \frac{(F_{\text{тр}} + \Delta F) l}{t_3} = (F_{\text{тр}} + \Delta F) \sqrt{\frac{\Delta F l}{2m}} \approx F_{\text{тр}} \sqrt{\frac{\Delta F l}{2m}}.$$

Сила трения $F_{\text{тр}}$ в каждом цикле принимает случайное значение, зависит от скорости движения и изменяется в процессе выдергивания засова, следовательно, ΔF также величина случайная. Механическая мощность при выдергивании засова пропорциональна $\sqrt{\Delta F}$. Время выдергивания засова обратно пропорционально $\sqrt{\Delta F}$. Например, для привода ОДК с параметрами механизма: $D = 140$ мм; $d = 10$ мм; $k_{\text{р}} = 0,17$; $k_{\text{к}} = 0,303$; $m_3 = 137$ кг; $l = 70$ мм, время выдергивания засова при $\Delta F = 50$ Н составляет $t_3 = 0,62$ с.

На рис. 1 приведена экспериментальная осциллограмма тока якоря двигателя привода ОДК экскаватора ЭКГ-12.

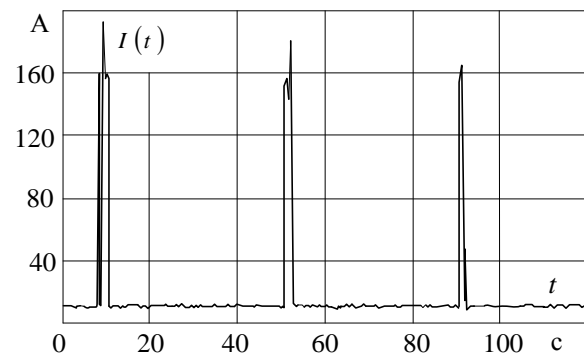


Рис. 1. Экспериментальная осциллограмма тока двигателя

В режиме подтягивания троса угловая скорость ротора двигателя практически равна 0. Поэтому в статорной обмотке двигателя происходит только электротепловое преобразование.

Электропривод ОДК должен обеспечивать максимальный момент $M_{\text{макс}} > k_{\text{д}} k_{\text{р}} k_{\text{к}} F_{\text{тр}}$ при выдергивании засова, а мощность двигателя с учетом отсутствия охлаждения должна быть [8]

$$P_{\text{н}} > \frac{P_{\text{п}}}{\beta_0 (1 - \eta)},$$

где β_0 – коэффициент изменения теплоотдачи с корпуса двигателя при стоянке; η – КПД двигателя; $P_{\text{н}}$ – мощность потерь в обмотках двигателя.

Электропривод ОДК

На рис. 2 приведена функциональная схема электропривода ОДК с новой системой управления [10]. Якорь двигателя постоянного тока М механически соединен с лебедкой Л, которая с помощью троса Т, рычагов на стреле РС и днище ковша РД соединена с защелкой З. Обмотка возбуждения ОВ двигателя получает питание от тиристорного выпрямителя ТВ, а якорная обмотка подключена к выходу усилителя мощности У. Для измерения тока якорной обмотки двигателя используется датчик тока ДТ. Напряжение на якорной обмотке измеряется датчиком ДН. Задатчик ЗУС формирует сигнал, пропорциональный номинальной угловой скорости двигателя. Пропорциональный регулятор напряжения РН формирует выходной сигнал, который действует на входе управляемого блока ограничения задания тока БОТ, формирующего сигнал задания для подчиненного контура тока электропривода. Ограничение тока в БОТ задается выходным сигналом RS-триггера: ток подтягивания устанавливается при логической единице на выходе RS-триггера, ток выдергивания защелки

устанавливается при логическом нуле RS-триггера. Состояние RS-триггера определяется действием сигналов блока начальной установки БНУ, кнопки управления КУ на джойстике машиниста и выходным сигналом порогового элемента ПЭ. В подчиненном контуре регулирования тока электропривода используется пропорционально-интегральный регулятор РТ.

В начальный момент работы привода RS-триггер установлен в состояние логического нуля на выходе. При включении машинистом кнопки управления КУ RS-триггер переходит в состояние с уровнем логической единицы на выходе. При этом в БОТ устанавливается максимальное значение ограничения тока. Ток и пропорциональный ему электромагнитный момент двигателя резко возрастают. Это приводит к выдергиванию засова 3. После выдергивания засова нагрузка электропривода резко уменьшается и происходит снижение тока двигателя. При достижении током порогового уровня, заданного пороговым элементом ПЭ, происходит переключение последнего и установка RS-триггера в состояние с уровнем логического нуля на выходе.

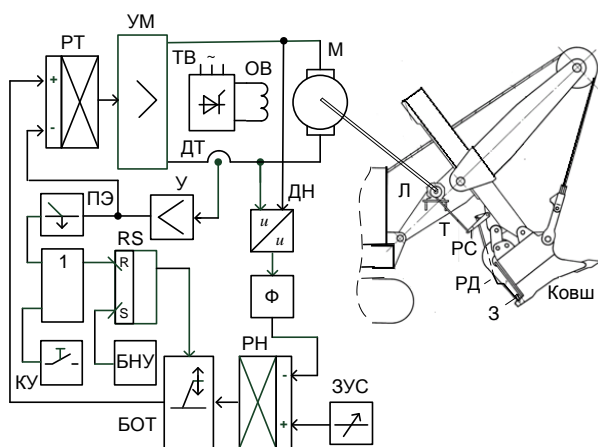


Рис. 2. Функциональная схема электропривода ОДК

Ток якорной обмотки двигателя пропорционален моменту нагрузки. Следовательно, в процессе выдергивания засова он снижается при снижении силы сопротивления движению. При этом минимизируются механическое воздействие на элементы устройства и тепловыделение в якорной обмотке двигателя. В результате этого обеспечивается повышение надежности механизма ОДК экскаватора.

На рис. 3 показаны осциллограммы тока двигателя I , скорости V и перемещения Z засова при открывании днища ковша, полученные моделированием процессов.



Рис. 3. Осциллограммы процессов для тока двигателя, скорости и перемещения засова в электроприводе ОДК

Заключение

В электроприводе ОДК карьерного экскаватора нагрев двигателя находится в зависимости от алгоритма управления. Разработанный электропривод постоянного тока обеспечивает требуемые характеристики и обеспечивает снижение механической нагрузки и тока двигателя. Характеристики электропривода ОДК подтверждены опытной эксплуатацией на экскаваторе ЭКГ-12.

- [1] Hustrulid W., Kuchta M., and Martin R. Open pit mine. Planning and design. Vol. 1. Fundamentals. CRC Press, 2013. – 1306 p.
- [2] Modern American coal mining: methods and applications / Edited by C.J. Bise. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 2013. – 564 p.
- [3] Чулков Н.Н. Электрификация карьеров. – М., Недра, 1974. – 344 с.
- [4] Дроздова Л.Г., Курбатова О.А. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж, ремонт. Владивосток, Изд-во ДВГТУ, 2007. – 235 с.
- [5] Ефимов В.Н., Цветков В.Н., Садовников Е.М. Карьерные экскаваторы: Справочник рабочего. – М., Недра, 1994, С. 120-128.
- [6] Патент РФ № 2012741, МПК E02F 9/020. Способ управления приводом механизма открывания днища ковша карьерного экскаватора / Е.М. Садовников, И.В. Бессонов, А.В. Толмачев. – Опул. 15.05.1994. Бюлл. № 9.
- [7] Ярцев Г.М. и др. Экскаваторы ЭКГ-4,6А и ЭКГ-4,6Б. Конструкция и эксплуатация. - М.: Машиностроение, 1970, – С. 15-21.
- [8] Малафеев С.И. Электропривод переменного тока открывания днища ковша экскаватора // Электротехника, 2022, № 4. – С. 33-38. doi: 10.53891/00135860_2022_4_34
- [9] Pat. US № 4839547. Int. Cl. H02K9/00. Motor frame and motor with increased cooling capacity / R.E. Lordo, W.E. Rudisch. Date of Patent: June 13, 1989.
- [10] Патент РФ № 2701674. МПК E02F 9/20; E02F 3/43; E02F 3/46. Способ управления электроприводом открывания днища ковша экскаватора / С.И. Малафеев, С.С. Малафеев. - Опул. 30.09.2019. Бюлл. № 28.

ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР В ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ СТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ СМАЗЫВАНИЕМ

Маленко П.И.

E-mail: pawel.malenko@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет», Тула, Россия.

Процесс трансформации исходных структур при фрикционном нагреве имеет стадийный характер: вначале происходит миграция атомов в поверхностной зоне, определяющая их энергетически более выгодное положение. На второй стадии под влиянием фрикционного нагрева возникают диффузионные процессы, трансформирующие структурно-фазовый состав. Процесс образования вторичных структур зависит от морфологии поверхности трения, трансформации температурных процессов в поверхностной зоне, типа и механизмов диффузионных процессов и формирования вторичных структур в процессе трения. Исследования диффузионных процессов, возникающих под действием фрикционного нагрева и сопровождающих образование вторичных структур, вследствие разнообразия факторов имеют свои особенности.

Ключевые слова: исходные структуры, вторичные структуры, фрикционный нагрев, диффузионные процессы, поверхностная зона, теплостойкие стали, никотрированное защитное покрытие, ресурсное смазывание.

Введение

В современных машинах и механизмах широко используют узлы с ресурсным смазыванием, то есть смазыванием на определенный цикл работы. Специфические условия эксплуатации предъявляют различные требования, как к технологическим методам упрочнения трущихся поверхностей, так и к оценкам триботехнической работоспособности подобных узлов. Характерным примером в данном отношении являются узлы стрелково-пушечного вооружения (СПВ). Особенностью конструкции СПВ является наличие большого количества контактирующих между собой деталей автоматики, взаимодействующих при высоких удельных давлениях, нестационарном скоростном относительно скольжении и воздействии

DIFFUSION PROCESSES IN THE FORMATION OF SECONDARY STRUCTURES IN THE SURFACE ZONE OF COATED STEELS DURING SLIDING FRICTION WITH RESOURCE LUBRICATION

Malenko P.I.

The process of transformation of the initial structures during frictional heating has a staged character: first, the migration of atoms in the surface zone occurs, which determines their energetically more advantageous position. At the second stage, under the influence of frictional heating, diffusion processes arise that transform the structural-phase composition. The process of formation of secondary structures depends on the morphology of the friction surface, the transformation of temperature processes in the surface zone, the type and mechanisms of diffusion processes and the formation of secondary structures in the friction process. Studies of diffusion processes arising under the action of frictional heating and accompanying the formation of secondary structures, due to a variety of factors, have their own characteristics.

Keywords: initial structures, secondary structures, friction heating, diffusion processes, surface area, heat-resistant steels, nicotrated protective coating, resource lubrication.

отработанных пороховых газов с одновременным наложением вибраций и ударных нагрузок. В качестве финишной операции используется процесс низкотемпературной нитроцементации (процесс никотрирования).

В работах В.М. Власова [1, 2] решены вопросы технологического обеспечения упрочнения, проанализированы кинетические особенности и механизмы повреждаемости материалов с различными структурами, условия зарождения и роста трещин. На основании этого разработаны критерии оценки работоспособности, прогнозирования и диагностики поверхностных слоёв в условиях эксплуатации. Однако в данных исследованиях не учитывался температурный фактор, что значительно сужает круг изделий СПВ,

на которые можно распространить полученные результаты. В работах Ю.Н. Дроздова и П.И. Маленко [3, 4] исследовано влияние фактора фрикционного нагрева на процессы структурно-фазовых изменений и образование вторичных структур (ВС) в поверхностной зоне. Однако, диффузионные процессы, способствующие этапу образования ВС, не исследовались.

При анализе диффузионных процессов, приведенных в работах авторов других школ, следует отметить следующие моменты.

Общие закономерности диффузионных процессов в металлах были определены Б.С. Бокштейном [5], но в них не учитываются специфические особенности фрикционного нагрева.

Интерес представляют достижения, полученные в новом для науки о трении направлении – нанотрибологии, развиваемом в работах О.М. Брауна, Г.В. Дедкова, В.И. Бутенко [6-8].

Низший уровень структурной масштабной иерархии – атомный уровень, исследованный посредством моделирования методом молекулярной динамики и применения измерительных средств в виде атомного силового микроскопа проанализирован в работах С.А. Кузнецова, В.С. Красникова, А.Ю. Куксина, В.В. Прудникова, М.И. Баскеса [9-13].

К методологическим недостаткам проведенных исследований следует отнести их реализацию в континуальном приближении, не учитывающем особенности процессов, происходящих на атомном уровне и влияющих на исследуемые микропроцессы.

Вместе с тем механизмы трансформации исходных структур (ИС) и образование ВС, в основе которых лежат диффузионные процессы, вследствие разнообразия факторов, имеющих свои особенности, не исследованы. Решение данной проблемы, а именно исследование диффузионных процессов, возникающих под действием фрикционного нагрева, а точнее под влиянием термического удара и является предметом настоящей работы.

Материалы и методы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования с применением методов механики, физики и химии сплошных сред (континуальное приближение) показали, что процесс образования ВС зависит от морфологии поверхности трения, трансформации температурных процессов в поверхностной зоне, типа и механизмов диффузионных процессов и формирования ВС в процессе трения. В свою очередь данные факторы

влияют на механизмы поверхностной повреждаемости (адгезия, схватывание) и усталостного износа (поро- и трещинообразование). Некоторые из указанных факторов действуют на нанометровом и атомном уровнях.

Исследовались диффузионные процессы в парах трения скольжения со смазочным материалом при рабочих нагрузках: давление $\sigma = 1 \dots 10$ МПа, скорость трения $V_{тр} = 0,5 \dots 10$ м/с, марка теплостойкой стали – 25Х3МЗНБЦА, смазочный материал – индустриальное масло И-20, упрочняющее покрытие – карбонитридный (никотрированный) слой толщиной $h = (10 \dots 15) \cdot 10^{-6}$ м.

Результаты и обсуждение

Процесс образования ВС находится в тесной связи с процессом ликвидации ИС и можно предположить, что образование ВС происходит также с участием резонансных процессов. Данное предположение основывается на результатах работы [14]: ингредиенты для образования ВС могут находиться или в разных средах (кислород и сера – в окружающей среде, матрицы Fe и Mo – в диффузионной зоне) или в одной среде (атомы P, S, Si и матрицы Fe и Mo – в диффузионной зоне); в этой связи механизмы образования ВС имеют различный характер: образование оксидных и отчасти сульфидных фаз происходит во встречных диффузионных потоках, образование фосфидных, силицидных и сульфидных фаз в диффузионной зоне происходит с участием процесса случайных блужданий диффундирующих атомов, образующегося под влиянием резонансов.

Диффузионные процессы на встречных потоках рассматриваются в работах [15, 16], но необходимо при их анализе учитывать специфику фрикционного нагрева. Диффузионные процессы в поле случайных блужданий, анализирующиеся в работах [16, 17] оставляют в стороне вопрос о причинах возникновения этого явления в диффузионной зоне.

Согласно экспериментальным данным в поверхностной зоне образуются фазы FeSi, FeS₂, Fe₂P, MoSi_{0,65} и MoS₂ [17]. После распада ИС атомы S, P, Si находятся в хаотическом положении. Для перехода их в движение (диффузия) необходимо силовое воздействие. Этим воздействием служит фазовый резонанс, детально рассмотренный в работе [18]. Представим уравнение цепочки нелинейных осцилляторов в виде

$$\ddot{x} + \omega_0 x = -2\gamma \dot{x} + \beta x^3 + f(\cos \omega t + \varphi) \quad (1)$$

Наличие ангармонизма во внешнем воздействии приводит к появлению гармоник в

основных колебаниях внешнего воздействия ($\omega t + \varphi$). В работе [18] доказано, что резонанс появляется не только при совпадении частот внешнего воздействия ω с собственной частотой ω_0 , но и при выполнении соотношений между частотами вида

$$m\omega + n\omega_0 = 0 \text{ или } m\omega + k\omega_0 = 0, \quad (2)$$

где m и $k = n+1$ – целые числа.

Таким образом, появляется резонанс на гармониках и субгармониках основных частот внешнего воздействия ω .

Так как отношение $\frac{n+1}{m} < 1$, то частоты гармоник меньше частот ω_0 , в результате чего появляется фазовый резонанс.

Следует также различать основной и вспомогательный фазовый резонанс. Основной резонанс имеет место при условии, что отношение k/m – целое число. Основной резонанс определяет возникновение и форму фазового резонанса. Вспомогательные резонансы играют пассивную роль. В табл. 1 приведены частоты фазовых резонансов на гармониках для диапазона температур $\Delta T = (200 \dots 700)^\circ\text{C}$.

Табл. 1. Значения параметров резонанса на гармониках в зависимости от температуры [18]

T, °C	ω , 1/c	ω_1 , 1/c	ω_2 , 1/c	ω_3 , 1/c
200	1,48	0,74	0,37	0,18
300	1,60	0,80	0,40	0,20
400	1,74	0,87	0,44	0,22
500	2,16	1,08	0,54	0,27
600	2,76	1,38	0,39	0,40
700	3,40	1,70	0,85	0,43

В свою очередь тепловые колебания атомов имеют спектр в диапазоне $\Delta \omega_0 = (10^{11} \dots 10^{12}) 1/c$ [4] и в этой связи фазовые резонансы на гармониках будут для всех частот, приведенных в табл. 1.

Сложную динамику, возникающую в этом случае в поверхностной зоне при наличии периодического внешнего воздействия, целесообразно представить в геометрической интерпретации, а именно: рассмотреть резонансы на фазовом пространстве в сечении Пуанкаре [18]. Во-первых, фазовое пространство перпендикулярно частотному резонансу. Во-вторых, сечение Пуанкаре – это процедура, которая сопоставляет динамике в рамках дифференциальных уравнений некоторое отображение (сечение). Идея состоит в следующем: в фазовом пространстве строится некоторая поверхность (тор) и изучается поведение точек пересечения фазовой траектории (она отражает геометрическую интерпретацию). Решение

задачи в рамках неавтономного нелинейного уравнения 2^{10} порядка с диссипацией для цепочки связанных осцилляторов имеет вид

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x - \beta x^3 = f(\cos \omega t + \varphi), \quad (3)$$

для которого определены параметры частотного резонанса. Важным для сечения Пуанкаре является понятие предельного цикла. Предельный цикл для описания дифференциального уравнения 2^{10} порядка – это замкнутые траектории в фазовом евклидовом пространстве [19]. Предельный цикл соответствует устойчивому поведению периодического режима системы. В фазовом пространстве частотный резонанс соответствует тору (рис. 1, а). Идея Пуанкаре состоит в следующем. В фазовом пространстве строится некоторая поверхность (в нашем случае тор). Производится сечение тора плоскостью, пересекающей центр тора, перпендикулярной плоскости частотного резонанса. В данном сечении анализируется полученная картина (отображение).

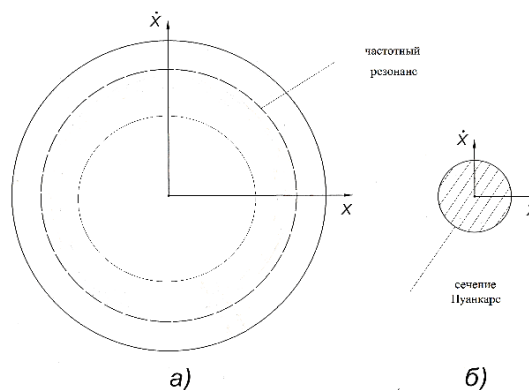


Рис. 1. Форма частотного резонанса (а) и сечение Пуанкаре (б) в фазовом пространстве

Динамика изменения состояния фазовой картины в сечении Пуанкаре представлена на рис 1, б. Частотный резонанс представлен в виде вложенных друг в друга окружностей. Окружность с максимальным диапазоном – это частотный резонанс между основной частотой внешнего воздействия ω и частотой тепловых колебаний атомов ω_0 . Следующая окружность представляет собой частотный резонанс между частотой первой гармоники ω_1 и ω_0 и так далее. Вспомогательные орбиты (когда k/m – не целое число) не содержат элементов фазового резонанса в виде точек (рис. 2, а). Наличие амплитуды внешнего воздействия влечет за собой превращение “точечных” отображений фазового резонанса в “ожерелье” из отдельных элементов фазового резонанса, напоминающего по форме стоячую волну (рис. 2, б).

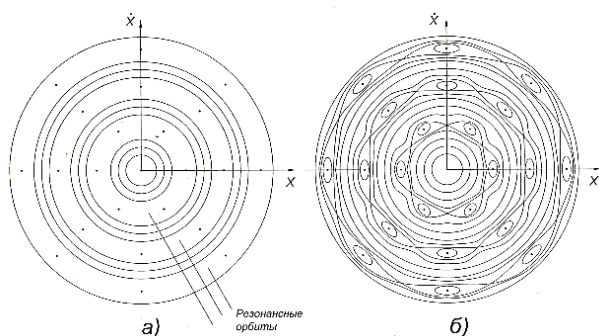


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая фазовый портрет нелинейного осциллятора в стробоскопическом сечении Пуанкаре при исчезающей малой амплитуде периодического внешнего воздействия (а) и при конечной амплитуде (б)

Рассмотрим влияние частотного резонанса на изменение положения атомов P, S, Si. Наибольшее влияние на процесс миграции указанных выше атомов оказывает фазовый резонанс, расположенный между двумя внешними орбитами частотного резонанса. Из неустойчивых точек фазового резонанса начинается процесс образования вдоль сепаратрисы электронного стохастического поля. Увеличение амплитуд внешнего воздействия приводит к образованию аттракторов (рис. 3).

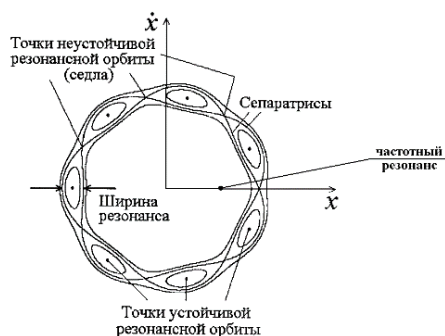


Рис. 3. Фазовый портрет изолированного нелинейного резонанса в стробоскопическом сечении Пуанкаре

Образующийся аттрактор – это множество фазового пространства динамической системы. В нашем случае это расположение электронов на пересекающихся встречных потоках. Электроны, имеющие скорость $V_{эл}$ и плотность ρ , действуют на атомы. В результате атомы образуют процесс случайных блужданий, который приводит к возникновению атомного механизма диффузии.

Заключение

Проведенный анализ показал, что диффузионные процессы возникают в результате действия частотного резонанса, приводящего к появлению кооперативного механизма диффузии.

В зоне резонанса действуют с одной стороны электронные волны, определяющие параметры диффузионного процесса на фронте и амплитуде резонанса. При этом имеет место увеличение

коэффициентов диффузии. С другой стороны, параллельно возникают фононные волны, вызывающие структурные изменения, в частности, появление пластической текучести.

Установлены механизмы диффузии при образовании ВС. В собственно поверхностной зоне под действием фазового резонанса образуется процесс случайных блужданий, приводящий к атомному механизму диффузии и образованию фаз FeSi, FeS₂, Fe₂P.

- [1] Власов В.М. Работоспособность упрочнённых трущихся поверхностей. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
- [2] Власов В.М., Нечаев Л.М. Работоспособность высокопрочных термодиффузионных покрытий в узлах трения машин. – Тула: Приокское книжное издательство, 1994. – 237 с.
- [3] Дроздов Ю.Н., Маленко П.И. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях сталей при трении скольжения // Трение и износ. – 2014. – Т. 35. – № 1. – С. 87-98.
- [4] Дроздов Ю.Н., Маленко П.И. Исследование резонансных процессов в поверхностных слоях пар трения скольжения со смазочным материалом, вызванных термическими ударами // Вестник машиностроения. – 2015. – № 2. – С. 44-52.
- [5] Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. – М.: МИСИС, 2005. – 362 с.
- [6] Браун О.М. Нанотрибология: механизмы трения на атомном уровне // Актуальные проблемы современного материаловедения: в 2 т. – Киев: ИД “Академперіодика”, 2008. – Т. 2. – С. 253-268.
- [7] Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – № 1. – С. 585-618.
- [8] Бутенко В.И. Научные основы нанотрибологии. – Таганрог: Издательство ТТИ ЮФУ, 2010. – 275 с.
- [9] Компьютерное моделирование молекулярной динамики граничного смазочного слоя / С.А. Кузнецов и др. // Физика, химия и механика трибосистем. – 2010. – № 9. – С. 14-20.
- [10] Пластическая деформация при высокоскоростном нагружении алюминия: многомасштабный подход / В.С. Красников [и др.] // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52. – Вып. 7. – С. 1295-1304.
- [11] Куксин А.Ю., Стегайлов В.В., Янилкин А.В. Молекулярно-динамическое моделирование динамики краевой дислокации в алюминии // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 420. – № 4. – С. 467-471.
- [12] Прудников В.В., Вакилов А.Н., Прудников П.В. Фазовые переходы и методы их компьютерного моделирования. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 224 с.
- [13] Baskes M.I. Modified embedded-atom potentials for cubic materials and impurities // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2004. – Vol. 46. – № 5. – P. 2727-2742.
- [14] Маленко П.И., Зеленко В.К., Левин Д.М. Температурные поля и эксплуатационные свойства пар трения скольжения со смазочным материалом / Под ред. Ю.Н. Дроздова. – М.: Машиностроение, 2011. – 239 с.
- [15] Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. – М.: Энергоиздат, 1984. – 181 с.
- [16] Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. – М.: Наука, 1979. – 343 с.
- [17] Шьюмон П. Диффузия в твердых телах. – М.: Металлургия, 1966. – 195 с.
- [18] Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания. – М.: Физматлит, 2002. – 292 с.
- [19] Кондратьев А.С., Ляпцев А.В. Сечение Пуанкаре при описании поведения нелинейных систем // Компьютерные инструменты в образовании. – 2012. – № 1. – С. 39-47.

КОНТУРЫ ДЕГЕЗИОННО-ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ

Марков Д.П.

E-mail: markov.dmitry@vniizht.ru , dp-markov@yandex.ru

АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.

Доклад посвящён фундаментальной проблеме контактного взаимодействия и трения тел на атомно-молекулярном уровне. Рассмотрены заблуждения, которые привели к созданию адгезионно-деформационной теории внешнего трения. С учётом теории гибридизации и дегибридизации валентных связей пересмотрены представления о строении поверхностей конденсированных тел и силах, возникающих при контактном взаимодействии. На основе новых представлений о межатомных силах притяжения (адгезионных и когезионных) и отталкивания (дегезионных), уточняется роль межатомных сил в процессах сухого трения и в создании граничного слоя при трении со смазкой. Контуры дегезионно-деформационной теории трения, намеченные ранее для условий сухого трения, уточняются для условий трения со смазкой.

Ключевые слова: Адгезия, когезия, дегезия, поверхность, внешнее трение, лубрикация.

Введение

Доклад реферировать статью [1], в которой развиваются идеи, изложенные автором на ТРИБОМАШ-2020 [2]. Доказывается, что гипотеза адгезионного сцепления твёрдых тел, лежащая в основе современной теории внешнего трения, является одним из трёх величайших научных заблуждений, наряду с небесной механикой Птолемея и теорией флогистона.

С учётом теории гибридизации и дегибридизации валентных связей пересмотрены представления о строении поверхностей конденсированных тел и силах, возникающих при контактном взаимодействии. Уточнено, какие из адгезионных, когезионных и дегезионных межатомных сил участвуют в процессе сухого трения, а какие создают граничный слой при трении со смазкой. Намечены контуры дегезионно-деформационной теории трения.

Антология заблуждений

Множество ошибок было сделано в трибологии и в физике поверхности, которые привели к рождению мифа о существовании адгезии между твёрдыми телами. Выделим основные этапы.

COUNTURS OF DEHESION-DEFORMATION THEORY OF EXTERNAL FRICTION

Markov D.P.

The report is devoted to the fundamental problem of the contact interaction and friction of bodies at the atomic-molecular level. The misconceptions led to the creation of the adhesion-deformation theory of external friction are considered. Taking into account the theory of hybridization and de-hybridization of valence bonds, the concepts of the structure of the surfaces of condensed bodies and the forces arising at contact interaction are revised. Based on new concepts of interatomic forces of attraction (adhesive and cohesive) and repulsion (dehesive), the role of interatomic forces in dry friction processes and in the creation of a boundary layer at lubricated friction is refined. The contours of the dehesion-deformation theory of friction outlined early for dry friction are being refined for lubrication conditions.

Keywords: adhesion, cohesion, dehesion, surface, external friction, lubrication.

В 1734 г. Деагюлье объяснил слипание смазанных поверхностей и кусочков свинца действием молекулярных сил притяжения. Он предположил, что уменьшение шероховатости должно приводить к сближению трущихся поверхностей, усилению молекулярного сцепления между ними и возрастанию силы трения.

Кулону (1785 г.) приписывается представление о двойственной молекулярно-механической природе трения [3].

В начале 20 века многочисленные опыты Якоб, Гарди, Томлинсона, Лэнгмюра, Шефера, Гольма и Кириштейна, Шоу и Ливи, Доу и др. доказали, что сглаживание и очистка поверхностей различных материалов, в особенности в вакууме, приводит к резкому возрастанию трения.

Позже Пашли, Петика и Тэйбор доказали, что при сжатии в ультравысоком вакууме можно создать прочное адгезионное соединение даже таких твёрдых металлов, как W и кристаллический Ni, но при давлении в 5 раз превышающем предел текучести Ni.

Леннард–Джонс, Ричардс и др. нашли зависимость сил между молекулами газов и жидкостей от расстояния.

Томлинсон на основании подобной зависимости попытался создать молекулярную теорию трения, основанную на диссипации энергии при разрыве адгезионных связей. Но, как он сам же заметил, если бы между атомами на поверхностях тел возникали такие связи, то силы сухого трения сильно зависели бы от скорости, чего не наблюдается.

Дерягин полагал, что силы притяжения имеют большой эффективный радиус действия (по сравнению с силами отталкивания), поэтому их тангенциальную составляющую в первом приближении можно считать равной нулю, силы же трения создаются в результате преодоления барьеров атомно-молекулярной шероховатости.

Усилиями Боудена, Тэйбора, Крагельского и многих других разработана адгезионно-деформационная или молекулярно-механическая теория трения (АДТТ). По этой теории трение представляет сумму адгезионного сцепления микровыступов и их "механического зацепления". При некотором критическом давлении происходит "схватывание" тел на большой площади, пластический сдвиг смещается под поверхность, и возникает катастрофический износ.

В конце 20-го, начале 21-го веков множество экспериментов на атомно-молекулярном уровне, казалось бы, убедительно доказали наличие сил притяжения между атомами на поверхностях тел. Но, чем глубже наука проникала в мир атомов, тем дальше уходила от понимания того, что происходит в мире реальных тел.

Почему же адгезия не проявляет себя в статических макро контактах твёрдых тел? МакФарлайн и Тейбор в 1950 г. высказали мнение, что это связано с эффектом высвобожденных упругих напряжений.

В 1971 г. Джонсон, Кендалл и Робертс, а в 1975 г. Дерягин, Мюллер и Топоров разработали модели высвобождения упругих напряжений при адгезионно-упругом взаимодействии, которые были проверены на коллоидах, а затем неправомерно обобщены и на твёрдые тела [4-6].

В этой теории игнорируется очевидная закономерность: чем мягче металлы, тем при более низких нагрузках они слипаются. Капли ртути сливаются в одну при соприкосновении, кусочки индия слипаются при небольшом сдавливании, чтобы слиплись два свежесрезанных куска свинца их необходимо ещё и прокрутить, вольфрам можно

соединить с кристаллом никеля, но только в вакууме, только при очень больших давлениях и только по определённым плоскостям.

При трении адгезия ещё более редкое явление. Мною было показано, что все случаи "схватывания" и переноса при более тщательном рассмотрении оказываются или абразивным срезом, или задиром, т.е. чисто механическим пропахиванием смежных поверхностей сцепленными выступами [7, 1] Связь между продуктами изнашивания при этом, как хрупких, так и пластичных материалов, оказывается чисто механической (при высоких давлениях и скоростях могут возникать прочные соединения, но не адгезионные, а когезионные).

Ошибки были допущены также в термодинамике поверхностей. Предполагалось, что при раскалывании кристалла связи между атомами разрываются, и образуется новая поверхность с "болтающимися" связями. Прирост энергии тела E при этом пропорционален площади поверхности A :

$$E = TS - pV + \mu N + \gamma A. \quad (1)$$

где: T – температура, S – энтропия, p – давление, V – объем тела, N – число частиц, μ – химический потенциал, γ – удельная поверхностная энергия. Размерность γ , Дж/м², совпадает с размерностью силы, действующей вдоль поверхности на отрезке единичной длины $\sigma = F/l$, Н/м. Это стало причиной отождествления γ с поверхностным натяжением σ и искажения представлений о поверхностных явлениях. Подмене этих понятий способствовал упрощенный термодинамический анализ двухфазной системы [8], не учитывающий пластическую деформацию, а также замена Гиббсом переходного слоя между фазами границей нулевой толщины [9]. Всё это привело к ошибочному выводу, что чем больше сила поверхностного натяжения F_s , тем больше γ и тем сильнее поверхности притягиваются друг к другу. На самом деле перестройка связей и увеличение F_s уменьшает γ .

Взаимодействие атомно-молекулярных структур

Упрощенно контактное взаимодействие атомно-молекулярных субстанций можно представить следующим образом: электронные уровни (оболочки) атомов застраиваются периодами. Каждый период заканчивается инертным газом с полностью застроенными оболочками. Между инертными газами и другими атомами действуют квантово-механические силы отталкивания (дегезионные силы). Атомы с недостроенными оболочками объединяются в

молекулы, дополняя свои оболочки до структуры инертных газов валентными связями. При столкновении на высоких скоростях ($T > T_{\text{кипения}}$) молекулы отскакивают друг от друга как атомы инертных газов. При $T < T_{\text{кипения}}$ молекулы объединяются в жидкости посредством менее прочных гибридных связей (когда Эйнштейна спросили что он думает о работе одного из основателей теории гибридизации Лайнуса Полинга, он ответил: "Для меня это слишком сложно"). Гибридизация позволяет атомам объединяться с большим числом соседних атомов. В жидкостях непрочные гибридные связи постоянно переключаются между атомами или молекулами, мешая им вылететь за её пределы. В наружном слое жидкостей частично остаются валентные связи (дегибридизация), вследствие чего между соседними атомами возникают силы поверхностного натяжения, а между смежными поверхностями – слабые силы отталкивания, которые позволяют водомеркам бегать по воде. В твёрдых телах временные случайные связи сменяются постоянными структурированными связями в кристаллической решётке или хаотическими аморфными во внутренне напряжённом каркасе. Прочность решётки или каркаса обеспечивается связью каждого атома с некоторым координационным числом ближайших атомов. При затвердевании жидкостей увеличивается прочность не только внутренних гибридных связей, но и поверхностных валентных. В результате сложных процессов на поверхностях твёрдых тел (подробнее см. [1]) создаются инертные электронные структуры, и силы притяжения сменяются силами отталкивания. *Обратная зависимость сил притяжения и отталкивания является следствием периодического закона заполнения электронных оболочек. Полное отсутствие когезионных сил равносильно действию дегезионных.*

Таким образом, между твёрдыми телами в обычных условиях действуют дегезионные силы отталкивания. Для преодоления сил дегезии и создания прочного когезионного соединения твёрдых тел на воздухе требуется внешняя энергия – энергия активации. На рис. 1 представлена уточнённая зависимость силы взаимодействия атомов двух твёрдых тел от расстояния (F_k – критическая сила, при которой отталкивание мгновенно сменяется притяжением).

В контакте твёрдых тел адгезионная составляющая отсутствует. Трение и износ при давлениях и скоростях, не превышающих

критические, возникают вследствие взаимодействия шероховатостей от нано-уровня и выше, а при высоких – вследствие задира или заедания (размазывания) [1, 7]. Продукты изнашивания после отделения приобретают свойства твёрдых тел и между ними возникают силы отталкивания.

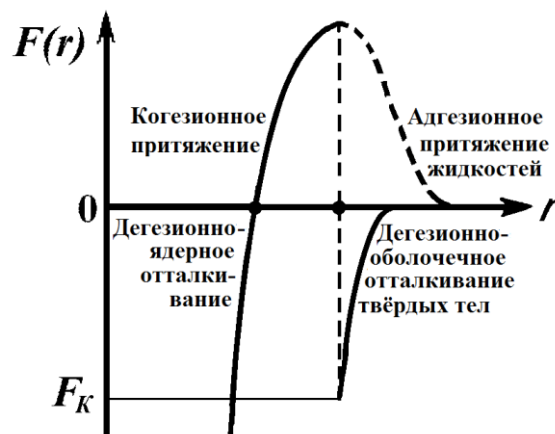


Рис. 1. Принципиальный вид зависимости силы взаимодействия атомов твёрдых тел от расстояния (пунктиром показана адгезионная ветвь жидкостей)

Смазка

Снизить трение и предотвратить износ твёрдых тел может только разделение их слоем с низким сопротивлением сдвигу, т.е. лубрикация. Для того, чтобы смазочный материал оказывал смазочное действие, он должен втягиваться и удерживаться в зоне контакта. Очевидно, что затягивать смазочный материал в зону контакта и удерживать его там могут как молекулярные силы, так и выступы шероховатости. Однако способность неровностей втягивать жидкости в зону трения ограничена: чем выше выступы, тем больше жидкости они захватывают, но вместе с тем и быстрее разрушаются. Эффективность маслосодержащего рельефа также невысока, поскольку он снижает реальную площадь контакта и несущую способность узла трения. Поэтому триботехника движется в направлении увеличения зеркальности поверхностей трения с одновременным увеличением их адгезионно-когезионного взаимодействия со смазочными материалами.

Жидкости ведут себя по-разному при качении и скольжении в силу различия их сопротивляемости нормальным и касательным напряжениям (различия прочности адгезионно-когезионных связей на отрыв и сдвиг). При изменении соотношения скольжения и качения меняется вид зависимости коэффициента трения от скорости скольжения и вязкости смазки (кривые Штрибека или, с учётом давления – Герси-Штрибека [3, 10]). Соответственно должны

меняться функции смазочных материалов и их адгезионно-когезионные способности.

Участок на кривой Штрибека с постоянным коэффициентом трения вблизи нулевой скорости обычно квалифицируют как зону граничной смазки. Однако если адгезия между телами и смазкой мала и смазка в статике полностью выдавливается из зоны трения, то в этой зоне реализуется твердотельное трение, а если адгезия высокая и смазка выдавливается не полностью – то трение при граничной смазке. Из-за схожести трибологических характеристик их часто путают. Но это вопрос не только терминологии. При плохой гидродинамике увеличение проскальзывания увеличивает протяженность диапазона, как твердотельного трения, так и при граничной смазке на весь диапазон скоростей, но при твердотельном трении узел выйдет из строя, а при граничной смазке будет продолжать работать. Схожесть твердотельного и граничного режимов создаёт ошибочное представление, что жидкостная плёнка полностью разделяет поверхности и поддерживает нагрузку только в режиме гидродинамической смазки. Но в режиме граничной смазки приработанные поверхности также полностью разделены жидкостью. Более того, именно граничный слой обеспечивает смазочное действие. Нет граничного слоя – нет смазки. Повышение коэффициента трения в граничном режиме связано не с металлическим контактированием, а с изменением строения граничного слоя [10].

Здесь следует указать на ещё один трибологический миф: гидродинамический режим подшипников скольжения на самом деле является результатом действия адгезионных сил, которые неявно входят в уравнения гидродинамики. Без адгезии могут работать только подшипники скольжения с принудительным нагнетанием масла или с периодическим наклонным рельефом, создающим подобную крылу подъёмную силу. В расчётных методиках адгезионные и когезионные свойства смазочных материалов напрямую обычно не учитываются. Неучёт роли адгезии особенно рельефно проявляется в расчётах эласто-гидродинамических режимов трения-качения.

Очевидно, что эффективно затягивать смазочный материал в зону трения могут только адгезионные силы, а удерживать его и дифференцированно распределять по толщине скорость течения и прочность на сжатие – только когезионные силы. Это в некоторой степени совпадает с современными представлениями, в которых адгезионные силы (см. рис. 1)

интерпретируются как физические связи, а когезионные – как химические. Различные масла с различными присадками способны создавать на поверхностях трения слои с дифференцированной вязкостью, полностью предотвращать металлическое контактирование и снижать коэффициент трения в режиме граничной смазки почти до гидродинамического уровня [9, 11, 12]. Полярные молекулы базового масла образуют металлоорганические соединения (адгезионно-когезионный переход). Противоизносные добавки, такие как диалкилдитиофосфат цинка, образуют стеклообразную структуру неорганического фосфата (дегезионно-когезионный переход). Первые обеспечивают легко сменяемый расходный слой, а вторые обеспечивают несущую способность. В условиях всестороннего сжатия первые проявляют свойства твёрдых тел, а вторые текут как жидкости, что обеспечивает их совместное смазочное действие. Полученная в результате пограничная плёнка получается более прочной и долговечной.

Заключение

Новые представления о строении поверхностей конденсированных тел и силах, возникающих при контактном взаимодействии, открывают широкие возможности для развития триботехники. Дегезионно-деформационная теория трения, изнашивания и смазки ещё примитивна, как всякая молодая теория, но за ней будущее.

- [1] Markov D.P. Adhesion at friction and wear // Friction. – 2022. – Т. 10. – № 11 (<https://doi.org/10.1007/s40544-021-0564-7>).
- [2] Марков Д.П. Теоретические основы трения и изнашивания. // Труды XIII Международной научно-технической конференции Трибология - машиностроению (ТриБОМАШ-2020). – М.: – 2020. – С. 165-170.
- [3] Занимательная трибология / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, С.Н. Бобров; – М.: Нефть и газ, 1999. – 232 с.
- [4] Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева; – М.: Наука, 2001, – 478 с.
- [5] Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петраковец. – ИММС НАНБ, Гомель, 2002 – 304 с.
- [6] Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications / V.L. Popov; – Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2010. – 362 с.
- [7] Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте / Д.П. Марков; – М.: Интекст, 2007. – 405 с.
- [8] Физика и химия поверхностей / Н.К. Адам; – М.-Л.: ОГИЗ ГТТЛ, 1947. – 552 с.
- [9] Физика поверхности / Э. Зенгуил; – М.: Мир, 1990. – 536 с.
- [10] Граничная смазка. Этапы развития трибологии / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс, Т.Н. Шабалина; – М.: Нефть и газ, 2002. – 230 с.
- [11] Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology / K. Ludema; – Boca Raton, New York, London, Tokyo: CRC Press, 1996. – 263 с.
- [12] Lubricant Additives. Chemistry and Applications. / Edited by Leslie R. Rudnick. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2009. – 777 с.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ.

Марченко Е.А., Петрова И.М.*

*E-mail: impetr@mail.ru

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Представлены результаты исследований, подтверждающие усталостный характер накопления повреждений и изменения коэффициента трения, зафиксированные при испытании на модели трения контакта. Показано, что разрушение металлов при динамическом воздействии и при трении характеризуется общими функциональными закономерностями

Ключевые слова: динамическое нагружение, коэффициент трения, долговечность, накопление повреждений, кривые усталости.

Введение

Значительный парк изделий машиностроения работает при динамическом нагружении, когда износ и усталостные разрушения в большой степени определяют их работоспособность и надежность. При этом в зависимости от окружающей среды и условий нагружения реализуются различные механизмы накопления повреждений и разрушения. Требуемый уровень надежности и долговечности механических систем, находящихся в эксплуатации, должен быть рассмотрен с учетом степени влияния этих факторов на накопление повреждений.

Трактовка износа как усталостного процесса [1] дает основания для исследований в поисках общих закономерностей накопления повреждений и разрушения металлов при динамическом нагружении и при трении. Исследования проводятся в различных направлениях [2-5]. В данной работе исследуются функциональные проявления процесса разрушения.

Результаты исследований

К настоящему времени накоплен большой объем информации по кривым усталости и развитию усталостных трещин от малоциклового до гигациклового области. Пример кривой усталости в широком диапазоне чисел циклов, полученной в работе [6] путем испытания при изгибе с вращением и ультразвуковых частотах нагружения науглероженной стали Cr-Mn-Si представлен на рис.1. На кривой четко выделяются три области: малоциклового усталости при высокой амплитуде напряжения (I), многоциклового

SOME REGULARITIES OF METAL FAILURE UNDER VARIOUS TYPES OF CYCLIC LOADING

Marchenko E.A., Petrova I.M.

The results of studies confirming the fatigue nature of damage accumulation and changes in the coefficient of friction recorded during testing on friction contact model are presented. It is shown that the destruction of metals under dynamic action and under friction, is characterized by general functional regularities.

Keywords: dynamic loading, friction coefficient, durability, damage accumulation, fatigue curves.

усталости, когда действующие напряжения не превышают предела упругости (II), и гигациклового усталости, когда трещина начинает расти от внутреннего включения, или от образованной мелкозернистой области при низкой амплитуде напряжений (III). Кривые усталости при вероятностях разрушения $P = 50\%$; 10% и 1% хорошо согласуются с экспериментальными данными, особенно для режимов I и II, как показано на рис. 1.

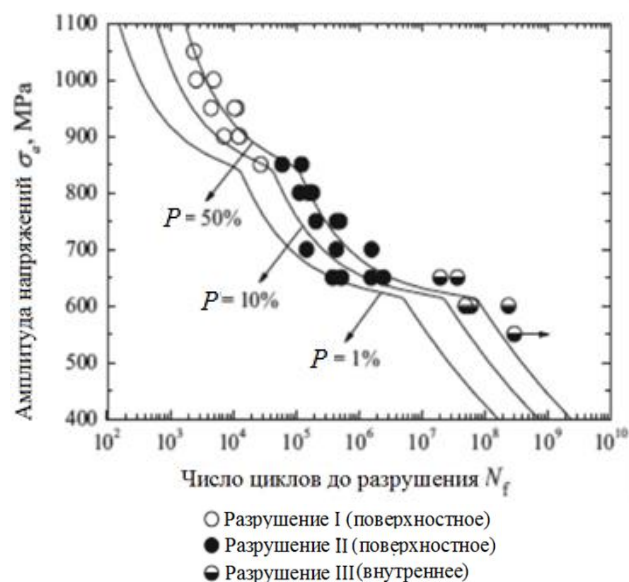


Рис. 1. Пример кривой усталости в широком диапазоне чисел циклов нагружения

При трении различные стадии усталостного процесса проявляются через зависимость коэффициента трения от нагрузки (рис. 2).



Рис. 2. Типичная кривая зависимости коэффициента трения от нагрузки [1]

Нисходящая ветвь характеризует область упругого контакта (многоцикловая усталость), восходящая – пластического (малоцикловая усталость), между которыми находится область перехода от одного вида контакта к другому [1].

На рис. 3 [7] представлены фрагменты типичных трибограмм – изменения силы (коэффициента трения) от продолжительности испытания и нагрузки, характеризующие усталостное разрушение. Результаты получены применительно к материалам, используемым в теплообменном оборудовании – титановым сплавам (BT1-00, ПТ-7М) и нержавеющей стали (08X18N10T, ХН35ВТ). Испытания проводились на одношариковом трибометре, при трении без смазки в интервале нагрузки 0,02-0,20 Н на базе 6000 циклов.

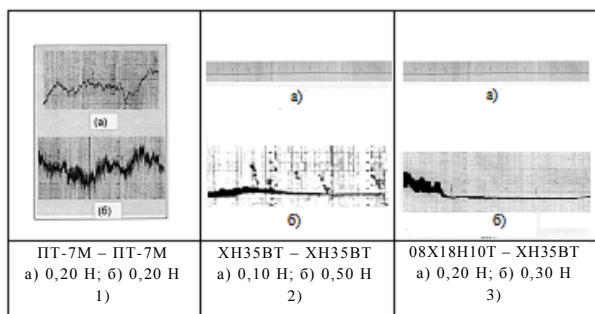


Рис. 3. Типичные трибограммы усталостного разрушения металлов при трении

При трении титановых сплавов ПТ-7М – ПТ-7М и BT1-00 – ПТ-7М изменение коэффициента трения носит периодический характер, аналогичный рис. 3.1. Такое изменение является отражением усталостных процессов в области пластического контакта (малоцикловая усталость) и связано с периодическим упрочнением и разрушением материала [5]. Момент начала разрушения одноименной пары ХН35ВТ фиксируется по

возникновению флуктуаций на трибограмме (рис. 3.2), а пары 08X18N10T – ХН35ВТ – по резкому увеличению коэффициента трения (рис. 3.3), что типично при разрушении в области упругого контакта (многоцикловой усталости). Количественная обработка трибограмм позволяет построить кривые фрикционной усталости (рис. 4).

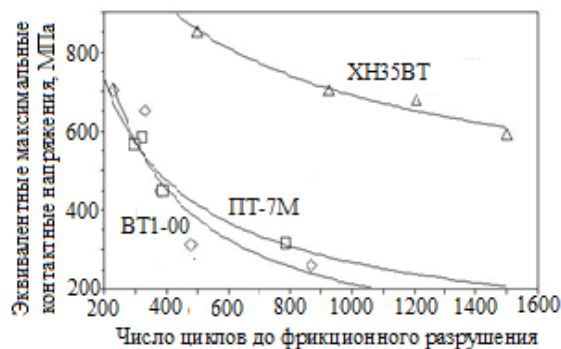


Рис. 4. Кривые фрикционной усталости для одноименных пар ХН35ВТ, ПТ-7М и BT1-00-ПТ-7М

Число циклов до разрушения для титановых сплавов определялось по среднему расстоянию между минимальными значениями коэффициента трения, которое вычислялось при статистической обработке 5-19 значений, а для нержавеющей стали – моментом начала осцилляций коэффициента трения или резким его увеличением. Для построения кривой фрикционной усталости пары 08X18N10T – ХН35ВТ данных оказалось недостаточно, т.к. момент разрушения был зафиксирован только при двух нагрузках. Число циклов до разрушения в сочетании с периодическим изменением коэффициента трения титановых сплавов и появлением частиц износа свидетельствует о малоцикловой усталости. Характер изменения коэффициента трения для сталей, отсутствие следов разрушения поверхности соответствует многоцикловой усталости [7].

Заключение

Таким образом, связь между напряжением и числом циклов до разрушения при трении аналогична той, что фиксируется при динамическом нагружении, с проявлением областей много- и малоцикловой усталости. В первом приближении данные по динамической усталости можно использовать при выборе материалов для узлов трения при условии, что на трибоконтакте не будет образования вторичных структур, отличных от исходных материалов

Усталостный характер накопления повреждений и изменения коэффициента трения зафиксированный при испытании на моделях

фрикционного контакта, подтверждают экспериментальные кривые фрикционной 10^8 – 10^9 циклов нагружения [8]. Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность использования данного подхода, усталости шеек коленчатого вала ЗМЗ-53 на базе связанного с учетом влияния величины износоусталостных повреждений, возникающих в процессе эксплуатации, на долговечность и надежность элементов сложных механических систем и к оценке вероятности их отказа как показано в [9].

- [1] Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968 – 480 с.
[2] Ботвина Л.Р. Разрушение, кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008 – 334 с.
[3] Лукашев Е.А., Сидоров М.И. Механохимическая кинетика накопления повреждений, разрушения и износа. М.: «Эко-Пресс», 2017 – 422 с.

- [4] Сосновский Л.А. Механика износоусталостного повреждения. Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
[5] Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. М.: Наука, 1979 – 118 с.
[6] Li W. et al. Evaluation of crack growth behavior and probabilistic S-N characteristics of carburized Cr-Mn-Si steel with multiple failure modes //Materials & Design. – 2014. – Т. 64. – С. 760-768.
[7] Марченко Е.А., Хрущов М.М., Каплунов С.М., Панов В.А. Трибологические свойства конструкционных сплавов деталей теплообменного оборудования, подверженных фреттингу// Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – Т.21. – №9. – С. 401-407.
[8] Еловой О.М., Богданович А.В. Ресурс подшипников коленчатого вала по критерию их локальной поврежденности: Труды VI Международного симпозиума по трибофатике (МСТФ-2010). / Минск, 2010. Ч. 1. – С. 247-251.
[9] Петрова И.М., Филимонов М.А., Лагуткин М.Г. Оценка вероятности отказа механических систем на основе моделирования их технического состояния // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 2. – С.12-18.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОРОЗОСТОЙКОЙ ПОЛУЖИДКОЙ СМАЗКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИММОТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В БОРТОВЫХ РЕДУКТОРАХ ТЕХНИКИ

Матина О.С., Волгин С.Н.

E-mail: 25gosnihim@mil.ru

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия.

Приведены результаты оценки противоизносных свойств полужидкой смазки для техники, эксплуатируемой в климатических районах с очень холодным климатом, основанные на моделировании химмотологических процессов, определяющих эффективность работы бортовых редукторов. Установлены зависимости влияния условий эксплуатации техники на уровень противоизносных свойств смазки. Определена оценка потенциальной способности смазки к проявлению заложенных противоизносных свойств.

Ключевые слова: морозостойкая полужидкая смазка, модель химмотологического процесса, противоизносные свойства, низкотемпературные свойства, модельная установка, теория планирования эксперимента, интегральная оценка.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ANTIWEAR PROPERTIES OF FROST-RESISTANT SEMI-LIQUID LUBRICANT BASED ON MODELING OF CHEMMOTOLOGICAL PROCESSES OCCURING IN ONBOARD GEARBOXES OF EQUIPMENT

Matina O.S., Volgin S.N.

The results of evaluating the anti-wear properties of a semi-fluid lubricant for equipment operated in climatic regions with a very cold climate are presented based on the modeling of chemmotological processes that determine the efficiency of the onboard gearboxes. Dependences of the influence of operating conditions of equipment on the level of anti-wear properties of the lubricant have been established. An assessment of the potential ability of the lubricant to manifest its anti-wear properties has been determined.

Keywords: frost-resistant semi-fluid lubricant, antiwear properties, low-temperature properties, chemotological process model, model installation, experiment planning theory, integral assessment.

Освоение климатических районов с очень холодным климатом, характеризуемым температурами до минус 65 °С, обуславливает необходимость применения в технике смазочных материалов, удовлетворяющих повышенным требованиям к уровню эксплуатационных свойств. В связи с тем, что применяемая в бортовых редукторах техники смазка ЦИАТИМ-208 имеет ограничения температурного диапазона применения (до минус 30 °С) разработка морозостойкой полужидкой смазки, обладающей улучшенными низкотемпературными и противоизносными свойствами является актуальной задачей.

Цель статьи: разработка морозостойкой полужидкой смазки, обладающей улучшенными эксплуатационными свойствами, и определение её потенциальной способности к проявлению заложенных противоизносных свойств.

На основе анализа состава выпускаемых и разработанных российских и зарубежных смазок определены перспективные компоненты для создания морозостойкой полужидкой смазки. В ходе дальнейших экспериментальных исследований выбраны: в качестве дисперсионной среды – смесь диоктилового эфира адипиновой кислоты с маловязким минеральным маслом веретенным АУ в соотношении 4:1, загущенная полимерным модификатором вязкости; дисперсной фазы – 12-оксистеарат лития; противоизносных и противозадирных присадок – фторопласт, наноразмерный дисульфид вольфрама и трикрезилфосфат, защитной присадки – смесь циклогексиламина и синтетических жирных кислот, антиокислителя – дифениламин.

С учетом того, что суммарная концентрация противоизносных и противозадирных присадок не превышает 9 % масс., определено, что для установления зависимости их влияния на противоизносные свойства смазки может быть использован симплекс-решетчатый план Шеффе.

На основе полученного по результатам испытаний на вибрационном трибометре уравнения регрессии в виде полинома третьего порядка (1) установлено влияние присадок на противоизносные свойства смазки:

$$y = 2953x_1 + 6327x_2 + 1742x_3 - 601x_1x_2 + 432x_1x_3 + 7337x_2x_3 + 619x_1x_2(x_1 - x_2) + 3654x_1x_3(x_1 - x_3) + 889x_2x_3(x_2 - x_3) - 40460x_1x_2x_3, \quad (1)$$

где y – значения отклика (объем износа пластины); x_1 – концентрация фторопласта, x_2 – концентрация наноразмерного дисульфида вольфрама, x_3 – концентрация трикрезилфосфата.

С использованием симплексного метода оптимизировано соотношение присадок в составе разработанной морозостойкой полужидкой смазки Ресма-А, обеспечивающее наилучшие противоизносные свойства при заданных температурах: фторопласт – 2,7 % масс.; наноразмерный дисульфид вольфрама – 2,1 % масс; трикрезилфосфат – 4,2 % масс.

По результатам квалификационных испытаний смазок Ресма-А и ЦИАТИМ-208 установлено, что смазка Ресма-А имеет более широкий температурный диапазон применения – от минус 65 °С до 150 °С, превосходит смазку ЦИАТИМ-208 по противоизносным свойствам. По показателям испаряемости, критической нагрузки и нагрузки сваривания смазки Ресма-А и ЦИАТИМ-208 имеют сопоставимый уровень свойств. Работоспособность морозостойкой полужидкой смазки Ресма-А подтверждена положительными результатами испытаний на шестерен-чатом стенде FZG, в котором реализуется режим трения качения с проскальзыванием, и на установке для определения вращающего момента подшипников при низких температурах, соответствующих условиям очень холодного климата.

При разработке смазки оценка её эксплуатационных свойств в конкретных условиях испытаний, используемая при производстве товарной продукции, является недостаточной, так как уже на этапе испытаний необходимо иметь информацию о возможном проявлении смазкой эксплуатационных свойств в различных условиях ее применения [1].

Для проведения экспериментальных исследований по оценке потенциальной способности к реализации заложенных свойств выбраны 3 образца смазочных материалов: полужидкая редукторная смазка ЦИАТИМ-208, принятая в качестве образца сравнения; трансмиссионное масло ТСз-9гип, обладающее хорошими низкотемпературными и высокими противозадирными свойствами, и разработанная смазка Ресма-А.

С учетом того, что зубчатые передачи работают в условиях качения с проскальзыванием, рабочие поверхности зубьев подвержены и усталостному изнашиванию (при трении качения), и заеданию в зонах проскальзывания в результате абразивного изнашивания, а наибольшие износы поверхностей происходят в режиме трения скольжения в условиях повышенных температур и нагрузок, для проведения исследований по установлению влияния условий применения на противоизносные свойства полужидкой смазки выбран вибрационный трибометр. Он обеспечивает критические условия, при которых наиболее

Табл. 1. Уровни варьирования и условия кодирования факторов при испытании смазочных материалов на вибрационном трибометре

Уровень варьирования факторов	Факторы условий процессов изнашивания		
	температура смазочного материала, °С	частота осцилляции пластины, Гц	давление в Герцевом контакте, МПа
Основной уровень «0»	85	48	214
Верхний уровень «+1»	100	64	366
Нижний уровень «-1»	70	32	62
Шаг варьирования	15	16	152
Кодовые обозначения	x_1	x_2	x_3

вероятна реализация процессов изнашивания, имеет высокую чувствительность исследуемого параметра к изменению состава смазочного материала и условиям протекания процесса, позволяет независимо варьировать факторами, определяющими процессы изнашивания: температурой смазочного материала, нагрузкой и скоростью скольжения.

На основе анализа условий работы полужидких смазок в бортовых редукторах в качестве определяющих факторов для исследуемых процессов изнашивания выбраны температура смазочного материала (T , °С) (x_1), частота осцилляции пластины (ω , Гц) (x_2), давление в Герцевом контакте ($P_{Герц}$, МПа) (x_3) (табл. 1) [2-4].

Так как опытом эксплуатации полужидкой смазки ЦИАТИМ-208 установлен повышенный износ зубьев шестерен, улучшение уровня противоизносных свойств было одной из ключевых задач при разработке состава морозостойкой полужидкой смазки Ресма-А. В связи с этим в качестве функции отклика определен объем износа поперечного профиля дорожки износа пластины (y) в области наибольшего износа, определяемой с использованием оптического профилометра Veeco WYKO NT1100 (рис. 1).



Рис. 1. Вид поперечного профиля дорожки износа пластины в области максимальной глубины износа

При обработке полученных данных рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии, описывающего зависимость противоизносных свойств от условий эксплуатации смазки.

$$U_{(ЦИАТИМ-208)} = 3093,00 + 215,38x_1 + 583,75x_2 + 489,88x_3 + 236,75x_1x_2 + 401,75x_2x_3 - 215,58x_1^2 - 78,83x_2^2 - 255,58x_3^2;$$

$$U_{(ТС3-9гип)} = 1173,00 + 126,63x_2 + 315,25x_3 - 87,25x_1x_2 - 107x_2x_3;$$

$$U_{(Ресма-А)} = 1100,00 + 208,63x_3 + 84,00x_1x_3 - 87,25x_2x_3 + 100,25x_3^2.$$

Из анализа значений коэффициентов уравнений регрессии, а также оценки их значимости следует, что наибольшее влияние на объем износа пластины для смазки ЦИАТИМ-208 имеет частота осцилляции пластины, для масла ТС3-9гип и смазки Ресма-А – контактное давление в трибосопряжении. Температура масла для ТС3-9гип, температура и частота осцилляции пластины для смазки Ресма-А не оказывают влияния на объем износа пластины в установленном интервале варьирования факторами. При этом совместное влияние температуры и частоты осцилляции пластины для масла ТС3-9гип и частоты осцилляции и давления для смазки Ресма-А приводят к снижению объема износа пластины.

Оценка влияния факторов на противоизносные свойства смазочных материалов проводилась на основе анализа двумерных $y=f(x_i)$ и трехмерных $y=f(x_i, x_j)$ сечений поверхностей отклика исследуемой функции при постоянных значениях других факторов.

На основе моделей, описывающих зависимость объема износа пластины от температуры смазки, частоты осцилляции пластины и давления, полученных в ходе экспериментальных исследований, рассчитывались интегральные оценки уровня противоизносных свойств полужидких смазок и масла ($Int(P_{эс})$) (2), которые характеризуют их потенциальную способность к проявлению заложенных свойств применительно ко всему диапазону условий их применения и к отдельным областям и их критерии ($K_{эс}$) – отношение интегральной оценки, исследуемого смазочного материала к интегральной оценке, полученной для смазочного материала принятого за образец сравнения (ЦИАТИМ-208) (табл. 2) [5].

$$Int(P_{эс}) = \int \dots \int_D F(X)dX, \quad (2)$$

где $P_{эс}$ – показатели противоизносных свойств полужидкой смазки, $F(X)$ – k -мерная функция.

Табл. 2. Значения интегральных оценок ($Int(P_{ЭС})$ и критериев ($K_{ЭС}$) противоизносных свойств смазочных материалов

	ЦИАТИМ-208	ТСз-9гип	Ресма-А
Суммарная интегральная оценка ($Int(P_{ЭС})_{\Sigma}$)	23 277	9 384	9 067
Суммарный критерий склонности к изменению эксплуатационных свойств ($K_{ЭС})_{\Sigma}$	1	0,40	0,39

По потенциальной способности к проявлению противоизносных свойств во всем диапазоне условий применения морозостойкая полужидкая смазка Ресма-А ($Int(P_{ЭС})_{\Sigma}(\text{Ресма-А}) = 9\ 067$, ($K_{ЭС})_{\Sigma}(\text{Ресма-А}) = 0,39$;) превосходит трансмиссионное масло ТСз-9гип ($Int(P_{ЭС})_{\Sigma}(\text{ТСз-9гип}) = 9\ 384$, ($K_{ЭС})_{\Sigma}(\text{ТСз-9гип}) = 0,40$) и смазку ЦИАТИМ-208 ($Int(P_{ЭС})_{\Sigma}(\text{ЦИАТИМ-208}) = 23\ 277$) по противоизносным свойствам, кроме того масло ТСз-9гип не может быть рекомендовано к применению в бортовых редукторах, так как не соответствует установленным требованиям по показателю нагрузки сваривания 3920 Н, при норме – не менее 6938 Н).

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что разработанная морозостойкая полужидкая смазка Ресма-А удовлетворяет требованиям по низкотемпературным свойствам,

имеет не только высокие трибологические характеристики по нагрузке сваривания, но и высокие, сопоставимые с маслом ТСз-9гип по уровню потенциальной способности к реализации противоизносных свойства. Смазка Ресма-А рекомендована к применению в бортовых редукторах техники, эксплуатируемой в районах с очень холодным климатом в условиях повышенных нагрузок.

[1] Волгин С.Н. Формирование требований к уровню эксплуатационных свойств топлив и смазочных материалов при их разработке // Химия и технология топлив и масел. 2020. №.5. С. 23-29.

[2] Горгоц К.Г. Стенд и комплекс измерительно-регистрирующей аппаратуры для экспериментальных исследований планетарных бортовых редукторов быстроходных гусеничных машин. Сборник научных трудов региональной научно-технической конференции Югорский промышленный форум: Югорский государственный университет. – Ханты-Мансийск, 2015. С.33-41.

[3] Губарь С.А., Пшеничный А.В. Обоснование параметров бортового редуктора для внедорожников // Автомобильный транспорт Дальнего Востока. 2014. №. 1. С. 113-118.

[4] Корнеев С.В. и др. Особенности эксплуатации наземной мобильной техники в условиях низких температур // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. №. 11. С. 33-36.

[5] Пименов Ю.М., Улитко А.В. Метод исследования склонности дизельных топлив к образованию высокотемпературных отложений // Химия и технология топлив и масел. 2019. №. 3. С. 16-21.

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ТЕЛАХ ТРЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СКОльзяЩЕГО ТОКОСЪёмНОГО КОНТАКТА

Мельник М.А.

E-mail: mma-sviblovo@rambler.ru

Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), Москва, Россия.

В статье рассмотрены составы вторичных структур тел трения на примере скользящих электрических контактов, зависимость состава структур от вида используемых материалов. На основе имеющихся данных сделаны предположения о механизмах структурообразования, о значении дополнительно вводимых в тела трения веществ

Ключевые слова: минимальный износ, исходный состав, структурообразование, состав структур, механизм формирования.

STRUCTURE FORMATION BY FRICTION ON THE EXAMPLE OF SLIDING ELECTRIC CONTACTS

Melnik M.A.

Friction-formed structures compositions and their dependence from used materials nature are considered in this article. Sliding electric contacts are example. Structure formation mechanism based in additionally introduced substances significance is assumed.

Keywords: minimal wear, original composition, structure formation, structure composition, formation mechanism.

Введение

В настоящей статье даются возможные представления о механизме возникновения вторичных структур на примере узла трения «контактный электрический провод - токосъёмные вставки» (скользящего электрического контакта), используемого в электрическом подвижном составе.

Представления о структурообразовании при трении основаны на положениях термодинамики неравновесного состояния, описанных в [1, 2]. Значительное место в них отводится протеканию в зоне трения самопроизвольных химических явлений [1, 3], ход которых может изменяться в зависимости от состава используемых материалов. Эти химические и физические явления способствуют перераспределению энергии и снижению затрат её на нежелательные явления, такие как износ. Задачей становится изучить влияние состава материалов на протекающие процессы, что проводится на основе их результатов. Этому посвящён настоящий доклад.

Материалы и методы

Состав вторичных структур каждого из тел трения определяли методом сканирующей электронной микроскопии. Исследование исходной микроструктуры, поверхности трения и подповерхностного слоя образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 (Tescan, Брно, Чешская Республика), оснащённом модулем для энергодисперсионного анализа (ЭДС) X-Act (Oxford Instruments, Абингтон, Великобритания) и программным обеспечением Aztec. Модуль позволяет определять элементный состав исследуемого участка с точностью до сотых долей процента. Все образцы исследовались на трех увеличениях: $\times 100$, $\times 500$, $\times 5000$, что соответствует видимым зонам $2,76 \times 2,76 \text{ мкм}^2$, $0,553 \times 0,553 \text{ мкм}^2$ и $55,4 \times 55,4 \text{ мкм}^2$ соответственно.

Для анализа состава вторичных структур использовались образцы с минимальной интенсивностью изнашивания, наблюдаемой после роста этой величины. Наличие минимума интенсивности изнашивания по мере роста значения передаваемого тока получило название «эффекта смазывающего действия тока». Минимальный износ тогда наблюдается для каждого из тел трения.

К «смазывающему действию тока» [1, 3], способно приводить одновременное протекание химических и механических явлений при трении при определённых условиях.

Предполагается, что в условиях, соответствующих «смазывающему действию тока», как и любому минимуму износа после

первоначального роста, новые структуры, при своём наличии снижающие трение, достигают своего максимального развития на каждом из тел трения. Это называется прохождением самоорганизации [1]. Для подтверждения такой точки зрения состав поверхностных структур, образующихся при трении, сравнивался со структурой тех же поверхностей до трения. На основе этого сравнения делались предположения о механизме возникновения новых структур при трении и о зависимости его от исходного состава материалов тел трения.

Определяли состав вторичных структур для токосъёмных вставок из материала на основе угольного кокса, в который вводился порошок железа с размером частиц 5-25 мкм. Материал используемых контактных вставок содержал в среднем 2,78% (графит А) и 4,68% (графит Б) железа (по экспериментальным результатам). Удельное электрическое сопротивление всех токосъёмных материалов составляло 25 мкОм·м, скорость взаимного скольжения при всех испытаниях 2 м/с (7,2 км/ч). Минимальные значения износа при трении для рассматриваемых материалов были получены при пропускаемом токе 40 А [1]. Износ был меньше при более высоком содержании железа, при одинаковых размерах его частиц.

Отдельно определяли состав вторичных структур контактного провода при работе с контактной вставкой на основе угольного кокса, содержащей 1,5% железа по массе. Таким образом, составы вторичных структур тел трения не находились в прямой зависимости между собой.

Сам состав определялся до и после трения на 4 участках квадратной формы размером $50 \times 50 \text{ мкм}$, на глубине до 1 мкм. Снимались по 4-12 значений состава поверхностного слоя каждого участка, до и после трения для провода, после трения для каждого материала контактных вставок.

На основе результатов определения состава поверхностных структур тел трения сделаны графически показанные соотношения между составляющими структуры элементами (рис. 1-3), они включают все точки, в которых сделаны измерения.

Результаты и обсуждение

Максимальную долю, особо видную в атомных процентах, во вторичных структурах на проводе составляет углерод (рис. 1, 2). Содержание железа в них до и после износа очень низкое, менее 1%. Низкое содержание железа во вторичных структурах контактного провода объясняется его механическими свойствами - такими, как более

высокая механическая прочность по сравнению с другими присутствующими веществами испытуемых материалов. Линейная зависимость, более сильно выраженная для изношенного провода (табл. 1), свидетельствует о схватывании между медным проводом и железом, попадающим на него при механическом разрушении материала контактной вставки, и о стремлении к более равномерному распределению.

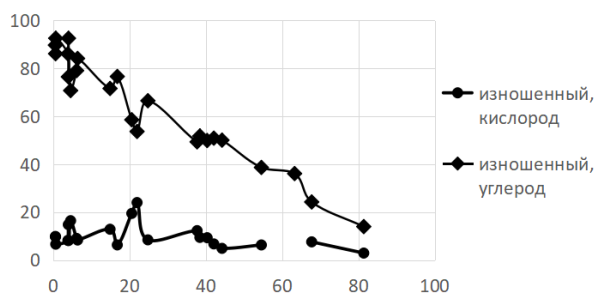


Рис. 1. Содержание кислорода и углерода в зависимости от содержания меди для вторичных структур изношенного провода

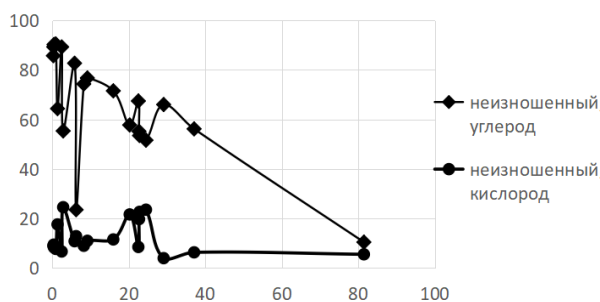


Рис. 2. Содержание кислорода и углерода в зависимости от содержания меди для вторичных структур неизношенного провода

Можно считать, что углерод в структурах после трения присутствует прежде всего в виде механического покрытия – твёрдой смазки.

В целом содержание углерода на поверхности провода мало различается для провода до и после износа (рис. 1, 2). Это позволяет считать, что снижение износа не обязательно определяется только наличием смазывающей прослойки. Предположение подтверждается и значениями коэффициентов трения, составляющих для пары «медь-медь» 1, а для пары «графит-металл» 0,1, или столько же для пары «металл-металл» при углеродной смазке.

В структурах изношенного материала провода более сильно выражена линейная зависимость между содержанием элементов (рис. 1, 2, табл. 1). Это свидетельствует об усилении упорядоченности в распределении элементов. Более высокая корреляция между элементами позволяет считать, что железо способствует структурообразованию, а

при определённом его содержании структуры достигают максимальных показателей (для контактных вставок – табл. 2).

Табл. 1. Коэффициенты корреляции между элементами в поверхностных структурах контактного провода

Наименование материала	Cu/Fe	Cu/O	Cu/C
Неизношенный	0,58	-0,14	-0,72
Изношенный	0,62	-0,34	-0,97

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между элементами во вторичных структурах контактных вставок на основе графита А и Б

Наименование образца	Cu/Fe	Cu/O	Cu/C
Графит А, изношенный	-0,23	-0,14	-0,77
Графит Б, изношенный	0,262		-0,67
	C/(Fe+Cu)		
Графит А, изношенный		-0,82	
Графит Б, изношенный		-0,95	

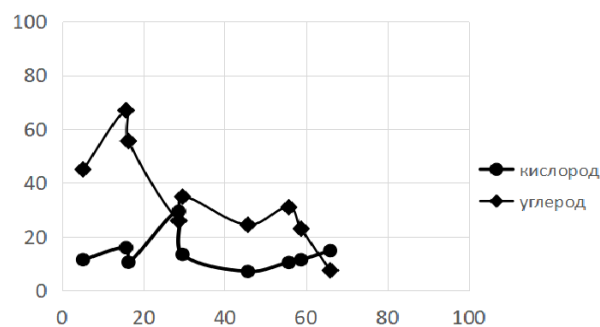


Рис. 3. Содержание кислорода и углерода в зависимости от суммарного содержания меди и железа для вторичных структур контактных вставок с содержанием железа 2,78% (графит А) после трения

В структурах контактных вставок зависимости между содержанием элементов также приближались к линейным, были аналогичными со структурами провода (рис. 1-3, табл. 2, 3). Это показывают и угловые коэффициенты линейных приближений зависимостей между содержанием элементов на рис. 1-3 и в табл. 3.

Табл. 3. Угловые коэффициенты линейного приближения зависимостей между содержанием элементов

Наименование образца	Угловые коэффициенты	
	C/металл	O/металл
Провод, неизношенный	-0,811	-0,046
Провод, изношенный	-0,879	-0,094
Графит А, изношенный	-0,688	-0,042

Рост упорядоченности распределения элементов в структурах при более высоком содержании дополнительно металла виден и на рис. 4, 5.

Для графита Б отмечено только две точки, где присутствовал кислород. В тех же точках содержание углерода снижалось на величину,

равную содержанию кислорода. Возможная причина меньшего числа точек с наличием кислорода для графита Б - более интенсивное протекание реакций восстановления окисленных металлов в каждом теле трения. Ему способствует и увеличение содержания железа, работающего как дополнительный восстановитель.

Для структур контактных вставок содержание железа было выше по сравнению со структурами провода. (до 2,5% для графита А, до 7% для графита Б). У образца с большим исходным содержанием железа (графит Б) его содержание во вторичных структурах после трения росло с содержанием меди, до 7% при 30% меди.

Для неизношенных контактных вставок точек имеется мало, содержание металлов крайне низкое, поэтому их приходится не рассматривать.

Для образцов контактных вставок с исходным содержанием железа 4,68% имелась область с большим содержанием меди, с расположением её параллельными прямыми линиями. Возможно та область была местом прохождения контртела из меди (рис. 5).

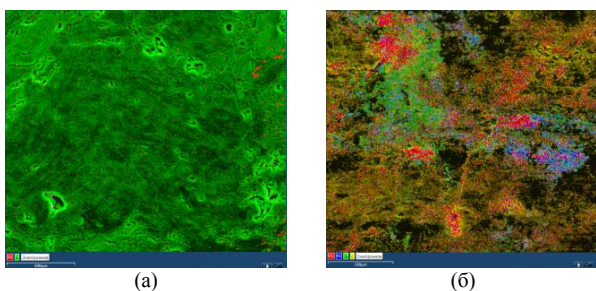


Рис. 4. Поверхности контактных вставок на основе графита А до (а) и после трения (б)

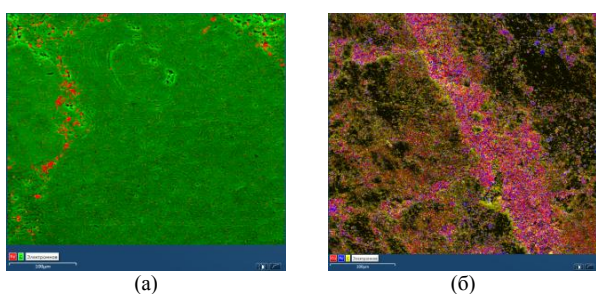


Рис. 5. Поверхности контактных вставок на основе графита Б до (а) и после трения (б)

Сами размеры частиц железа во всех испытанных образцах по сравнению с исходным состоянием имели меньшие размеры, до 5 мкм. Вместе с железом в образцах после трения обязательно присутствовала медь, но она отсутствовала до трения.

Полученные данные о соотношении элементов в структурах тел трения отчасти подтверждают точку зрения об участии железа в структурообразо-

вании и вызванном им снижении трения. Но невозможно подтвердить представление о прохождении при трении не самопроизвольных химических реакций, которые считаются способствующими структурообразованию при трении, снижению износа и перераспределению энергии между различными протекающими процессами [1, 2, 3]

Размеры частиц железа и его распределение означают его дробление при структурообразовании механическим, а также, согласно [4] электрохимическим способом. (Вариант переноса при расплавлении не рассматривается, потому что оценочная температура в зоне трения [5] сильно ниже точки плавления железа. Также расплавление подверженных трению материалов рассматривается как критический случай).

Предполагается, что на возможные при структурообразовании виды переноса дополнительно вводимых веществ будет уходить тем больше избыточной энергии, чем выше их температура плавления или ниже давление пара, и чем больше содержание. Но последнее не должно превышать определённый предел.

Наличие сходных зависимостей у материалов, используемых не совместно, позволяет говорить и о возможном предполагаемом при трении механизме структурообразования. К входящим в тот механизм явлениям может относиться схватывание материалов из контртел с последующими восстановлением металлов и изоляцией их от дальнейшего окисления (металлоплакирование). Снижать содержание кислорода в структурах изношенных тел в большей мере может и углерод - восстанавливать медь из окисленного состояния. Образующиеся в таком случае оксиды углерода могут во время трения создавать инертную атмосферу и отводить избыток энергии из зоны трения. Предполагать наличие отвода избытка энергии при действии газа позволяют и испытания на износ с обдувом зоны трения углекислым газом. В этом случае износ был меньше, а измеряемая температура - ниже.

При использовании материала контактных вставок с более высоким содержанием железа (в том числе в рассматриваемом примере) кислород во вторичных структурах мог вообще не регистрироваться.

На основе имеющихся результатов можно предполагать поочерёдное протекание при трении следующих процессов:

1. Первоначальное максимальное разрушение во время приработки, с выделением частиц металла из материала контактной вставки;

2. Измельчение частиц вводимого металла, затраты энергии на которое зависят от механической его прочности;

3. Рассеивание частиц металла по поверхности трения;

4. Химическое действие углерода и вводимого металла, направленное на снижение окисления тел трения. Это действие зависит от активности вводимого металла, размеров его частиц, распределения по зоне трения;

5. Восстановление меди вводимым металлом, схватывание с медью и изоляция её от окисления;

6. Действие образующихся оксидов углерода, создающих инертную атмосферу и отводящих избыток энергии;

Вторая, четвёртая, пятая стадии зависят от природы вводимого металла. Для них можно предполагать, что более прочный металл будет брать больше энергии на своё измельчение. Также с большей вероятностью в химические явления при трении будет вовлекаться более активный металл. Избыточная энергия, прежде всего электрическая, способствует активации химических процессов. Общее перераспределение энергии должно зависеть от количества вводимого металла. Но по наблюдаемым результатам нельзя дать

количественную оценку распределения энергии по разным направлениям и их значение в снижении износа. Сам описанный механизм также нельзя считать единственно возможным. Но он согласуется с теоретическими представлениями [1, 2, 3].

Заключение

В данном докладе рассмотрен состав структур, образующихся в телах трения, приведены установленные сходные зависимости распределения химических элементов в структурах.

Полученные результаты позволяют оценить механизм образования структур, взаимосвязи между составом образующихся структур и исходных материалов. Они могут использоваться в рекомендациях по подбору материалов, подверженных трению в различных условиях.

- [1] Гершман И.С., Подрабинник П.А. Адаптация материалов в виде самоорганизации при трении. // Глава в книге «Адаптивные материалы и покрытия для высокотехнологичных отраслей промышленности». МГТУ Станкин, 24-25 ноября 2021, – С. 151-165
- [2] Современная термодинамика / Пригожин И.Р., Кондепуди Д. М.: Мир, 2002. – 416 с.
- [3] Трибохимия / Хайнике Г. М.: Мир, 1986. – 582 с.
- [4] Физикохимия трения / Шпеньков Г.С. Минск, Университетское, 1991. – 397 с.
- [5] Углеродистые материалы / Фиалков А.С. М.: Энергия, 1979. – 320 с.

УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИРОВАНИЕМ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ АРГОНА

Метель А.С., Мельник Ю.А., Мустафаев Э.С.

*E-mail: a.metel@stankin.ru

Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, Москва, Россия.

Целью работы является разработка технологии полирования изделий пучком ускоренных частиц. Впервые для полирования используется пучок быстрых атомов аргона под большим углом падения на поверхность. Осаждение покрытия в углублениях между выступами поверхности при их распылении пучком заметно повышает скорость обработки

Ключевые слова: полирование, пучок, быстрые атомы, распыление, осаждение.

IMPROVEMENT OF THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A SURFACE BY POLISHING WITH A BEAM OF FAST ARGON ATOMS

Metel A.S., Melnik Y.A., Mustafaev E.S.

The aim of the study is to develop a technology for polishing products with a beam of accelerated particles. For the first time, a beam of fast argon atoms at a large angle of incidence on the surface is used for polishing. The deposition of the coating in the gaps between the surface protrusions during sputtering them by the beam significantly increases the processing speed.

Keywords: polishing, beam, fast atoms, sputtering, deposition.

Введение

Качество изделий машиностроения, особенно полученных методами аддитивного производства, можно заметно повысить, уменьшив шероховатость их поверхности путем полирования поверхности изделий. Механическое полирование включает удаление материала абразивными шлифовальными зернами, прилагаемыми к заготовке подвижной опорой, обычно диском или шлифовальной лентой, и сглаживание поверхности трением поверхности с мелким абразивом, обычно содержащимся в ткани или другом мягком материале. Механическое полирование отличается относительной дешевизной и может обеспечивать равномерность структуры поверхности, однако имеет и ряд недостатков: остающиеся в результате механической обработки в поверхностном слое материала частицы абразива и микроскопические царапины, сложность обработки объемных изделий; унос материала в процессе обработки и сложность контроля этого процесса.

В связи с этим получило развитие полирование поверхности ионным пучком. В работе [1] показано, что полирование пучком эффективно лишь при больших углах падения ($\alpha = 78^\circ - 82^\circ$) ускоренных частиц на поверхность изделия. Чтобы ионы при обработке диэлектрических изделий не отклонялись электрическим полем, возникающим в результате зарядки поверхности, в настоящей работе был использован пучок быстрых нейтральных атомов аргона.

Материалы и методы

На рис. 1 представлена схема устройства для полирования подложки быстрыми атомами аргона с большим углом падения на ее поверхность.

Установка содержит вакуумную камеру 1, устройство вращения 2 подложки 3 внутри камеры 1, магнетронный распылитель 4 наверху камеры 1 с источником электропитания 5, источник пучка 6 быстрых атомов 7 и съемный фланец 8 напротив него.

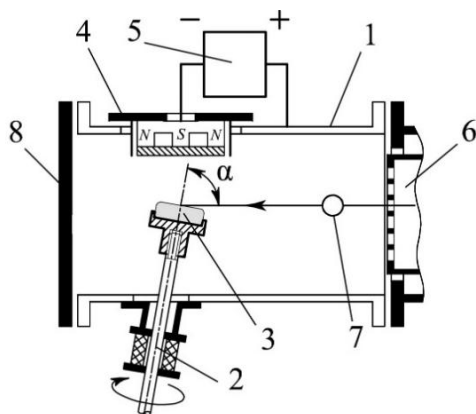


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Две сменные мишени диаметром по 100 мм магнетронного распылителя 4 изготовлены из титанового сплава ВТ-6 и жаропрочного сплава CoCrMo. Угол между осью вращения подложки 3 и осью источника пучка 6 равен 80° , поэтому быстрые атомы аргона 7 бомбардируют поверхность подложки 3 под большим углом падения $\alpha = 80^\circ$.

Шероховатость подложек измеряли с помощью стилусного профилометра Dektak XT производства США. Для определения толщины покрытия на подложке на ее поверхности перед осаждением покрытия закрепляли маску, а после осаждения покрытия и удаления маски определяли толщину покрытия по высоте ступеньки на профилограмме поверхности.

Полирование подложки пучком заключается в удалении с ее поверхности выступов в результате их распыления быстрыми атомами. При облучении вращающейся подложки 3 пучком быстрых атомов с большим углом падения на поверхность подложки (около 80°) быстрые атомы в первую очередь распыляют вершины выступов на поверхности подложки, а впадины между ними остаются в тени. Чтобы достичь низкой шероховатости поверхности нужно понизить уровень выступов до уровня впадин. Для этого нужно удалить с поверхности большое количество материала и затратить много времени. С увеличением исходной шероховатости время полирования подложки заметно возрастает.

Для изучения влияния полирования подложки быстрыми атомами аргона на коэффициент трения ее поверхности в качестве испытательной машины использовали прецизионный трибометр Tetra Basalt N2 фирмы Falex Tribology NV (Ротселаар, Бельгия). В качестве контртела использовался шар диаметром 4 мм из карбида кремния SiC. Испытания всех подложек проводились в условиях сухого трения при одинаковых нормальных нагрузках на контртело (1,0 Н), скорости вращения 3 об/с с радиусом траектории 5 мм, т. е. при относительной скорости перемещения 9,4 см/с и длине пути скольжения 1000 м (1600 циклов).

Результаты и обсуждение

Для проведения экспериментов из титанового сплава ВТ-6 изготовили 10 подложек диаметром 30 мм и толщиной 6 мм. После измерения с помощью стилусного профилометра Dektak XT исходной шероховатости поверхности $R_a = 0,42$ мкм одной из подложек ее вставили в чашу держателя подложек (рис. 1) и в течение часа распыляли поверхность вращающейся со скоростью 8 об/мин подложки под углом падения $\alpha = 80^\circ$ быстрых атомов аргона при токе пучка $I = 1$ А, ускоряющем напряжении

источника $U = 5$ кВ и давлении $p = 0,05$ Па. Остывшую в вакууме подложку извлекли из камеры и измерили шероховатость ее поверхности $Ra = 0,08$ мкм. Затем подложку снова вставили в чашу держателя и распыляли еще два часа. В итоге шероховатость плоской поверхности подложки уменьшилась до $Ra = 0,01$ мкм. Шероховатость ее цилиндрической поверхности, распылявшейся под углом падения $\alpha \sim 10^\circ$, составила $Ra \sim 0,4$ мкм.

Измерения с помощью трибометра Tetra Basalt N2 показали, что с уменьшением шероховатости от $Ra = 0,42$ мкм до $Ra = 0,01$ мкм коэффициент трения снизился от 0,38 до 0,28.

Чтобы изучить возможность полирования поверхности с большей исходной шероховатостью методом аддитивной технологии были изготовлены подложки диаметром 30 мм и толщиной 6 мм. В качестве исходного материала для их изготовления использовался мелкодисперсный порошок для аддитивного производства, полученный газовой атомизацией из жаропрочного сплава CoCrMo [2]. Подложки были изготовлены на промышленной установке для аддитивного производства EOS M 400.

Измерения с помощью профилометра Dektak XT показали, что шероховатость поверхности подложки, изготовленной из порошка CoCrMo, равна $Ra = 3,8$ мкм. После распыления поверхности этой подложки в течение трех часов под углом падения $\alpha = 80^\circ$ быстрых атомов аргона при токе пучка $I = 1$ А, ускоряющем напряжении источника $U = 5$ кВ и давлении $p = 0,05$ Па шероховатость уменьшилась до $Ra = 0,64$ мкм.

В результате последующей обработки этой подложки в течение еще трех часов шероховатость снизилась до $Ra = 0,09$ мкм. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность полирования поверхности пучком быстрых нейтральных атомов аргона с углом падения на поверхность 80° . Шероховатость вращающейся титановой подложки за три часа обработки была снижена от $Ra = 0,42$ мкм до $Ra = 0,01$ мкм. Однако, с ростом исходной шероховатости поверхности подложки до $Ra \sim 4$ мкм время, необходимое для ее полирования, увеличивается до неприемлемой величины, превышающей 10 часов.

Для снижения шероховатости поверхности во впадинах между ее выступами осаждали покрытие, распыляя магнетронную мишень из сплава CoCrMo. На подложку с исходной шероховатостью $Ra = 3,8$ мкм при давлении аргона $p = 0,3$ Па и токе магнетронного разряда $I_m = 4$ А в течение 3 часов осаждали покрытие состава CoCrMo. Средняя толщина покрытия достигла 15 мкм, однако его

шероховатость $Ra = 3,6$ мкм практически не изменилась.

Таким образом, осаждение покрытия [3-6] с толщиной, заметно превышающей шероховатость поверхности подложки, не может использоваться для ее полирования. Это объясняется тем, что скорость осаждения покрытия на выступах поверхности незначительно превышает скорость осаждения в углублениях между ними. Поэтому рельеф поверхности после осаждения покрытия практически не изменяется.

Для уменьшения времени полирования подложек, изготовленных аддитивным методом, предложено при распылении вершин выступов на поверхности подложки осаждать на нее покрытие из того же материала (рис. 2). В этом случае быстрые атомы 7 распыляют лишь верхушки выступов 10 на поверхности, а углубления 11 остаются в тени и в них беспрепятственно осаждается покрытие 9.

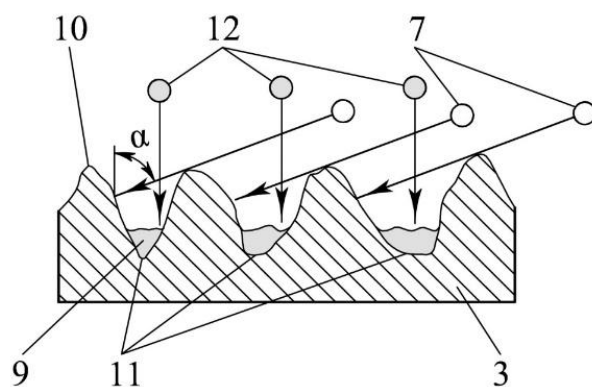


Рис. 2. Схема распыления быстрыми атомами выступов шероховатой поверхности с осаждением на нее покрытия

После осаждения покрытия с распылением подложки из CoCrMo в течение 3 часов пучком быстрых атомов аргона при угле их падения на поверхность 80° исходная шероховатость подложки $Ra = 3,8$ мкм снизилась до $Ra = 0,22$ мкм. Это в три раза ниже шероховатости подложки $Ra = 0,64$ мкм, полученной после распыления подложки в течение трех часов под углом падения $\alpha = 80^\circ$ быстрых атомов аргона при той же скорости вращения 8 об/мин, том же токе в цепи камеры $I = 2$ А и ускоряющем напряжении источника $U = 5$ кВ без осаждения покрытия.

В результате последующей комбинированной обработки этой подложки пучком быстрых атомов с осаждением на нее покрытия в течение еще двух часов шероховатость снизилась до $Ra = 0,02$ мкм.

Заключение

Изучение полирования пучком быстрых атомов аргона с большим углом падения на поверхность

обрабатываемой подложки показало, что с помощью пучка можно заметно повысить класс обработки поверхности и уменьшить коэффициент трения. При этом в поверхностном слое подложки отсутствуют частицы абразива и микроскопические царапины, характерные для механического полирования.

Осаждение на поверхность подложки покрытия с толщиной, значительно превышающей высоту выступов, не снижает ее шероховатость. Однако при осаждении покрытия на вращающуюся подложку, распыляемую пучком быстрых атомов аргона с углом падения на ее поверхность от 78° до 82° заполнение впадин между выступами материалом подложки и одновременное распыление вершин выступов заметно повышают скорость полирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер проекта FSFS-2021-0006).

Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инжиниринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021).

- [1] Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Боровская В.В., Машкова Е.С. Исследование процесса ионно-лучевой полировки поверхности оптических деталей приборов // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С. 36-38.
- [2] Łępicka M. et al. A comparative study of friction and wear processes of model metallic biomaterials including registration of friction-induced temperature response of a tribological pair // Materials. – 2019. – Т. 12. – № 24. – С. 4163.
- [3] Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 6. – С. 37-42.
- [4] Метель А.С., Болбуков В.П., Волосова М.А., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А. Устройство для осаждения тонких металлических пленок с бомбардировкой быстрыми атомами аргона // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 3. – С. 114-121.
- [5] Vereschaka A.A., Volosova M.A., Grigoriev S.N., Vereschaka A.S. Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition // Procedia CIRP. Сер. "2nd CIRP Global Web Conference - Beyond Modern Manufacturing: Technology for the Factories of the Future, CIRPe 2013", 2013. – С. 8-12.
- [6] Григорьев С.Н., Волосова М.А. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики // Вестник машиностроения. – 2005. – № 9. – С. 32-36.

ИЗНАШИВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА SnSbCu, СФОРМИРОВАННЫХ НА СТАЛЬНЫХ ПОДЛОЖКАХ ПРОЦЕССОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

¹Михеев Р.С. *, ^{1,2}Калашников И.Е., ²Быков П.А., ²Катин И.В., ²Кобелева Л.И.

*E-mail: mikheev.roman@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия;

²ИМЕТ РАН, г. Москва, Россия.

Представлены результаты исследований композиционных покрытий на основе сплава SnSbCu, сформированных на стальных подложках процессом дуговой наплавки вольфрамовым электродом в инертном газе. В качестве присадочных материалов применяли изготовленные методом экструзии композиционные прутки на основе сплава SnSbCu упрочненного интерметаллидными частицами (Al-Bi и Ti₂NbAl). Определено влияние состава на структуру, механические и триботехнические свойства наплавленных композиционных покрытий.

Ключевые слова: композиционные покрытия, дуговая наплавка, сплав SnSbCu, износостойкость, коэффициент трения.

Введение

Покрытие рабочих поверхностей деталей машин, изготавливаемых обычно из конструкционных сталей, слоем специального сплава, обладающего лучшим сочетанием функциональных характеристик, получило широкое применение в разных отраслях промышленности. Особое значение указанная технологическая операция приобретает для деталей машин, работающих в условиях трения и изнашивания. Наибольшее распространение в качестве специальных получили антифрикционные сплавы на основе олова (баббиты) и, в частности, системы SnSbCu. Несмотря на обширную область применения, включая изделия ответственного назначения, указанные сплавы характеризуются относительно малыми значениями предела усталости и износостойкости [1]. Для расширения областей их применений и повышения указанных характеристик в состав сплавов SnSbCu вводят наполнители микронного размера, создавая подобным образом композиционные материалы и покрытия из них [2]. Причем, наибольший интерес связан с опробованием и применением в роли

WEAR OF COMPOSITE COATINGS BASED ON SNSBCU ALLOY, FORMED ON STEEL SUBSTRATES BY THE ARC CLADDING PROCESS

Mikheev R.S., Kalashnikov I.E., Bykov P.A., Katin I.V., Kobeleva L.I.

The results of investigations of composite coatings based on the SnSbCu alloy, formed on steel substrates by the arc cladding process with a tungsten electrode in an inert gas, have been presented. Composite rods made by extrusion based on the SnSbCu alloy reinforced with intermetallic particles (Al-Bi and Ti₂NbAl) were used as filler materials. The influence of the composition on the structure, mechanical and tribological properties of deposited composite coatings has been determined.

Keywords: composite coatings, arc cladding, SnSbCu alloy, wear resistance, friction coefficient.

армирующих частиц интерметаллидов, например Al-Bi или Ti₂NbAl. Подобные наполнители обладают сочетанием высокой удельной прочности, жесткости, а также существенной металлической долей химической связи, что обеспечивает лучшую совместимость с материалом матрицы с термодинамической точки зрения [3]. Одним из экономически целесообразных, универсальных и широко распространенных методов формирования композиционных покрытий является процесс дуговой наплавки вольфрамовым электродом в инертном газе [4]. Поэтому настоящая работа посвящена исследованию структуры, а также механических и триботехнических свойств композиционных покрытий на основе сплава SnSbCu, сформированных на стальных подложках процессом дуговой наплавки.

Материалы и методы исследования

Композиционные покрытия формировали на подложках из конструкционной стали 20 (ГОСТ 1050) размером 150x120x10 мм процессом дуговой наплавки вольфрамовым электродом в инертном газе. В качестве присадочных материалов применяли разработанные дисперсно-наполненные

композиционные прутки диаметром 3 мм и длиной 300 мм на основе сплава системы SnSbCu – марка Б83 (ГОСТ 1320). В состав композиционных прутков вводили армирующие частицы интерметаллидов Al-Bi или Ti_2NbAl размером менее 100 мкм в количестве 3 масс. %. С целью обеспечения однородности структуры и изотропности свойств композиционные прутки получали с применением технологии порошковой металлургии процессом экструзии [5].

Дуговую наплавку композиционных покрытий осуществляли с помощью источника питания KEMPPИ MasterTig MLS 2300 ACDC на технологических параметрах режима: сила сварочного тока, $I_{св} = (55-65)$ А, прямая полярность (вольфрамовый электрод — катод, стальная подложка — анод); напряжение на дуге, $U_d = (18-20)$ В; скорость наплавки, $V_n = (12-15)$ м/ч; расход защитного газа (аргона), $V_{Ar} = (12-14)$ л/мин.

Микроструктуру сформированных композиционных покрытий исследовали на оптическом микроскопе LEICA DM ILM и электронном микроскопе Zeiss 1540EsB с приставкой для проведения энергодисперсионного анализа. Твёрдость наплавленных покрытий по Бринеллю (НВ) определяли на стационарном твердомере HBRVU-187,5 путём вдавливания индентора диаметром 2,5 мм при нагрузке 625 Н.

Триботехнические характеристики наплавленных покрытий оценивали в условиях сухого трения скольжения на установке CETR UMT Multi-Specimen TestSystem. Подготовленные образцы испытывали по схеме осевого нагружения (рис.1): вращающаяся втулка (контртело, сталь 45Х (ГОСТ 4543, HRC>45) против неподвижного диска (образец для исследования). Размеры контртела в виде втулки: внутренний диаметр 11,5 мм, наружный диаметр 16,2 мм. Размер образцов в виде диска - диаметр 20 мм, толщина 12 мм.

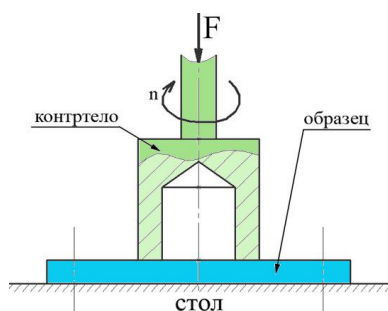


Рис. 1. Схема испытаний на трение и износ сформированных композиционных покрытий

Триботехнические испытания каждого образца осуществляли в широком диапазоне удельных

давлений при последовательном ступенчатом осевом нагружении: 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 МПа. С целью определения значений коэффициента трения в процессе испытаний проводили непрерывный обсчет параметров в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения UMT TestViewer. Значение скорости скольжения во всех экспериментах оставалось постоянным и составляло 0,5 м/с, время нагружения для каждого удельного давления составляло 600 с, а полный путь трения – 1500 м.

Износ испытываемых образцов оценивали по величине объёмной интенсивности изнашивания, I_v , мм³/м:

$$I_v = \Delta / (\rho * L_{тр}), \quad (1)$$

где $L_{тр}$ – полный путь трения; ρ – плотность материала испытываемого образца, а Δ – потеря массы образца, определяемая по формуле (2).

$$\Delta = m_1 - m_2, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 – масса образца до и после испытаний соответственно.

Дополнительно с помощью диаграмм процесса трения определяли значения коэффициента стабильности трения, представляющего собой безразмерную величину, характеризующую устойчивость процесса трения скольжения, а также уровень вибраций и шума достигаемые при трении.

Результаты и их обсуждение

Характерные микроструктуры наплавленных покрытий на основе баббита Б83 показаны на рис. 2. Видно, что в мягкой основе, представляющей собой α -твёрдый раствор сурьмы в олове, присутствуют кристаллы β -фазы, состоящие из твёрдого раствора на основе химического соединения SnSb. Причем, в отличие от структур, характерных для процессов литья, соединения SnSb обладают округлой геометрической формой с сильно развитой поверхностью и равномерно распределены в объёме. Кроме того, средний размер соединений SnSb, характеризующий их способность к выкрашиванию в процессе трения, существенно отличается в наплавленных композиционных покрытиях разного состава. В частности, в композиционном покрытии, содержащем армирующие частицы Ti_2NbAl , интерметаллиды SnSb характеризуются меньшим в 3-5 раз средним размером, по сравнению с таковым в композиционных покрытиях, содержащих в качестве наполнителя частицы Al-Bi (сравнить а и б на рис. 2). Данные особенности обусловлены не только присутствием тугоплавких упрочняющих интерметаллидных частиц, являющихся

термическими стопорами, ограничивающими кристаллизующиеся объемы, но и нестационарными условиями кристаллизации свойственными процессу дуговой наплавки.

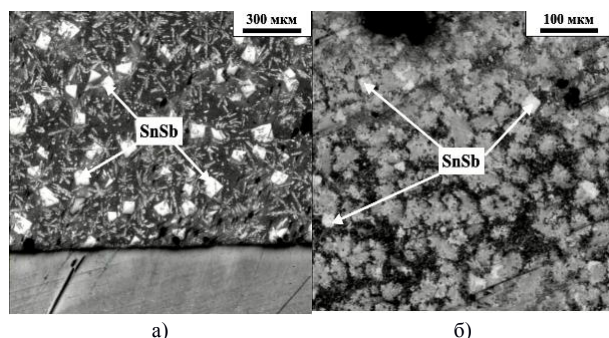


Рис. 2. Микроструктура наплавленных композиционных покрытий состава, масс. %:
а) B83 + 3 Al-Bi; б) B83 + 3 Ti₂NbAl

Непрерывная, не содержащая несовершенств линия сплавления наплавленных покрытий с подложкой позволяет говорить о высоком уровне их адгезионной прочности. Кроме того, следует отметить сохранение и присутствие интерметаллидных армирующих частиц во всем объеме наплавленного металла, о чем свидетельствуют результаты энергодисперсионного анализа.

Результаты испытаний на трение и износ композиционных покрытий состава B83 + 3 масс. % Al-Bi и B83 + 3 масс. % Ti₂NbAl представлены в табл. 1. Видно, что в всем интервале опробованных удельных нагрузок (от 0,5 до 2,5 МПа) меньшими значениями среднего коэффициента трения характеризуется сформированное дуговой наплавкой композиционное покрытие состава B83 + 3 масс. % Al-Bi. Кроме того, значения коэффициентов стабильности композиционного покрытия подобного состава выше таковых, для композиционного покрытия состава B83 + 3 масс. % Ti₂NbAl.

Табл. 1. Результаты испытаний на трение и износ наплавленных композиционных покрытий

Состав образца, масс. %	Значения коэффициента трения / коэффициента стабильности трения, в зависимости от удельной нагрузки, P (МПа)					Iv x 10 ⁻³ , мм ³ /м
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
B83 + 3 Al-Bi	0,353 / 0,85	0,258 / 0,92	0,227 / 0,91	0,17 / 0,86	0,133 / 0,93	4,9
B83 + 3 Ti ₂ NbAl	0,374 / 0,82	0,312 / 0,94	0,267 / 0,89	0,273 / 0,87	0,241 / 0,88	3,54

При этом следует отметить, что процесс сухого трения скольжения сформированных композиционных покрытий характеризуется удовлетвори-

тельной стабильностью (представленные в табл. 1 коэффициенты стабильности обладают значениями не менее 0,82) во всем диапазоне трибонагружения. Сопоставление значений объёмной интенсивности изнашивания показывает, что композиционное покрытие состава B83 + 3 масс. % Ti₂NbAl обладает на 30% лучшей износостойкостью по сравнению с покрытием состава B83 + 3 масс. % Al-Bi. Это связано, не только с лучшими прочностными характеристиками вследствие изменения размера интерметаллидных фаз SnSb, но и присутствием в составе композиционного покрытия более прочных высокомодульных частиц наполнителя — Ti₂NbAl.

Заключение

Процессом дуговой наплавки вольфрамовым электродом в инертном газе на стальных подложках сформированы композиционные покрытия на основе сплава SnSbCu, упрочненного интерметаллидными частицами (Al-Bi и Ti₂NbAl). В качестве присадочных материалов применяли изготовленные методом экструзии композиционные прутки на основе сплава баббита B83, содержащие 3 масс. % частиц Ti₂NbAl и Al-Bi размером не более 100 мкм.

Определено влияние состава на структуру, механические и триботехнические свойства наплавленных композиционных покрытий. Установлено, что в композиционном покрытии, содержащем армирующие частицы Ti₂NbAl, интерметаллиды SnSb характеризуются меньшим в 3-5 раз средним размером, по сравнению с таковым в композиционных покрытиях, содержащих в качестве наполнителя частицы Al-Bi. Показано, что в условиях сухого трения скольжения композиционное покрытие состава B83 + 3 масс. % Ti₂NbAl обладает на 30% лучшей износостойкостью по сравнению с покрытием состава B83 + 3 масс. % Al-Bi.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00366, <https://rscf.ru/project/22-29-00366/>.

- [1] Трение, износ и смазка: (Трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
- [2] Потехин Б.А., Глушенко А.Н., Илюшин В.В. Свойства баббита B83 // Технология металлов. – 2006. – №3. – С. 17-23.
- [3] Abioye T. E. et al. Effects of SiC additions on the microstructure, compressive strength and wear resistance of Sn-Sb-Cu bearing alloy formed via powder metallurgy //Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Т. 9. – №. 6. – С. 13196-13205.
- [4] Kalashnikov I. E. et al. Technological Parameters of Production and Properties of Babbit-Based Composite Surfacing Rods and Deposited Antifriction Coatings //Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Т. 10. – №. 3. – С. 635-641.

[5] Distl B. et al. Solid-solid phase transformations and their kinetics in Ti-Al-Nb alloys //Metals. – 2021. – Т. 11. – №. 12. – С. 1991-2011.
[6] Mikheev R.S. Innovative processes of production functional gradient layered compositions with enhanced tribological properties // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2020. – Т. 934. – №012036. – С. 1-6.

[7] Campos Alcover P.A., Pukasiewicz A.G. Evaluation of microstructure, mechanical and tribological properties of a Babbitt alloy deposited by arc and flame spray processes // Tribology International. – 2019. – Т. 131. – С. 148-157.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТРОТУАРНЫХ ПЛИТ НА СТАТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

Морозов А.В.

E-mail: morozovalexei@mail.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

В работе экспериментально исследуется влияние шероховатости поверхности тротуарных плит на статический коэффициент трения с резиновым контробразцом, который был изготовлен из подошвы обуви. Шероховатость лицевой поверхности плит была сформирована двумя способами: дробеструйной обработкой и шлифованием. Трибологические эксперименты были проведены при двух температурах +23 и -5 °С и двух удельных давлениях равных 0,04 и 0,4 МПа. В работе получено, что трение в контакте тротуарной плиты с резиной повышается с увеличением высотных (S_a , S_{sk} , S_{ku}) и гибридного (S_{dq}) параметров шероховатости.

Ключевые слова: мощность, сцепные свойства, коэффициент трения.

Введение

Практической мотивацией настоящего исследования является исследование сцепных свойств поверхности тротуарных плит, которые снижаются при их эксплуатации в условиях дождя (в особенности в условиях загрязнения поверхности дорожной пылью, смоченной каплями воды), а также при значительном снижении температуры окружающей среды. Отметим, что при трении скольжении резины (например, подошвы обуви) по шероховатой поверхности принято выделять два механизма диссипации энергии [1], которая расходуется на преодолении силы трения, а именно: энергия расходуется на преодоление сил адгезии в контакте и на вязкоупругое циклическое передеформирование резины неровностями поверхности. Второй механизм трения, называемый деформационным, напрямую связан с реальной шероховатостью поверхности, которую трудно математически описать, поскольку она имеет

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ROUGHNESS OF THE SURFACE OF PAVING SLABS ON THE COEFFICIENT OF FRICTION

Morozov A.V.

The influence of the surface roughness of paving slabs on the coefficient of friction with a shoes rubber were studied. The roughness of the surface of the slabs was formed by shot blasting or grinding. Tribological experiments were carried out at two temperatures +23 and -5 °C and two pressures equal 0.04 and 0.4 MPa. The results showed that the friction increases with increasing height (S_a , S_{sk} , S_{ku}) and hybrid (S_{dq}) roughness parameters.

Keywords: paving slabs, anti-slip properties, coefficient of friction.

сложную многомасштабную природу. Поэтому для описания шероховатости поверхностей со случайным рельефом, которые не подчиняется нормальному распределению Гаусса (например, поверхность после шлифования) в данной работе будет использован общий подход описания случайной шероховатости [2], который заложен в основу стандарта ISO 25178-2014 (ГОСТ Р ИСО 25178) и широко распространен в 3D профилометрах для анализа трехмерной топографии поверхности.

Материалы и методы

На рис. 1 продемонстрированы два типа образцов, которые были вырезаны из тротуарной плитки. Поверхности первого типа образцов были получены методом дробеструйной обработки, а поверхности второго типа методом шлифования.

Топографии полученных поверхностей были измерены при помощи 3D профилометра S Neox (Sensofar, Испания), который имеет

моторизованный X-Y предметный столик, позволяющий проводить измерения на больших площадях. Область единичного сканирования составляла 3,4x2,8 мм. Сшивание 525 рядом стоящих изображений позволило получить топографию поверхности размерами 5 на 5 см. Отметим, что определение высотных и гибридных параметров шероховатости осуществлялась по ГОСТ 2789-73, который позволяет определить одномерные (по сечению) параметры шероховатости, а также по ГОСТ Р ИСО 25178, который позволяет определить трехмерные (по площади) параметры шероховатости.

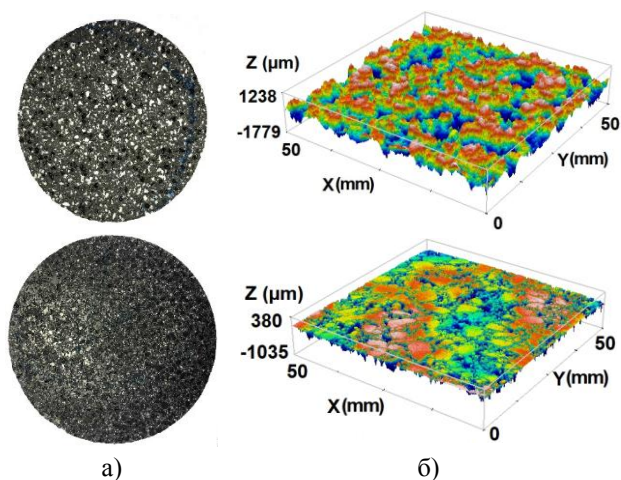


Рис. 1. Фотографии (а) и топографии (б) поверхности испытуемых образцов: сверху – дробеструйная обработка поверхности, а снизу её шлифование

Резиновый контробразец, был изготовлен из подошвы полуботинок модели Премиум 1302ПК, изготовленного по ГОСТ 12.4.137-2001, с материалом подошвы из термопластичного полиуретана. Контробразец в виде кольца с центральным отверстием ($D_{нар} = 60$ мм, $d_{внут} = 28$ мм) вырезался непосредственно из подошвы полуботинок (рис. 2а) коронкой и затем эпоксидным клеем наклеивался на предварительно изготовленную металлическую подложку, при этом их соосность с подложкой обеспечивалась при помощи специально изготовленного центриатора.

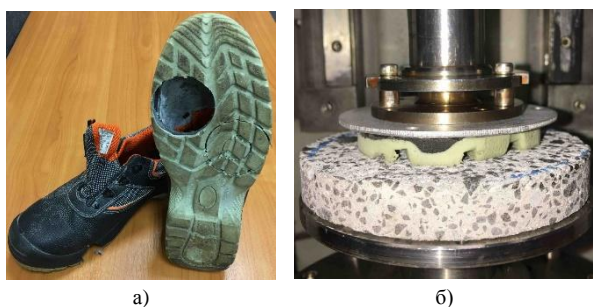


Рис. 2. Полуботинки (а) и испытуемая пара трения (б)

Трибологические испытания проводились на лабораторном трибометре UMT (SETR, США). Пара трения (рис. 2б) представляла собой два соосно расположенных и сопряженных между собой резинового контробразца и образца-диска, прижатых нормальной нагрузкой. Верхний контробразец неподвижен, а нижний образец вращался вокруг их общей оси. Нагрузка на контакт передавалась с заданной силой через двухкомпонентный тензометрический датчик, позволявший одновременно измерять нормальную нагрузку и момент трения, возникающий в процессе вращения нижнего образца. Нормальное давление в контакте варьировалась в диапазоне от 0,04 до 0,4 МПа, который был задан, опираясь на следующие соображения. Минимальная нормальная нагрузка $Q = 46,8$ Н на образец задавалась, исходя из условия обеспечения, предусмотренного ГОСТом 12.4.083-80 контактного давления равного $0,4$ кг/см² (0,04 МПа), характерного при полном прилегании подошвы обуви к опорной поверхности. Верхний порог исследуемого диапазона контактных давлений был выбран равным 0,4 МПа ($Q = 468$ Н). Основой такого решения являются данные из работы [3], в которой указывается, что контактное давление между колесом легкового автомобиля и дорожной поверхностью составляет 0,4 МПа.

Следует отметить, что поскольку протектор полуботинок рифленый очевидно, что контакт подошвы с опорной поверхностью происходит не по всей номинальной ее площади, а лишь на отдельных единичных участках, сумма площадей которых составляет фактическую площадь контакта ($S\phi$), которая существенно меньше номинальной. Поэтому фактическая площадь контакта была найдена методом отпечатков и составляла $S\phi = 11,7$ см² для резинового контробразца, представленного на рис. 2б.

При проведении испытаний при отрицательной температуре равной -5 °С трибометр оснащался выполненной из фторопласта термокамерой с вмонтированной в нее термопарой, которая крепилась к неподвижному контробразцу. Время выдержки пары трения после установления заданной отрицательной температуры составляло 60 минут.

Статический коэффициент трения определялся при скорости скольжения равной 0,01 мм/с. Такая скорость скольжения была выбрана исходя из выводов работы [4] из которых следует: статический коэффициент трения равен динамическому коэффициенту трения скольжения, измеренному при малых скоростях смещения.

Проведенные предварительные тесты в диапазоне скоростей скольжения от 0,01 до 10 мм/с показали (рис. 3), что в диапазоне скоростей скольжения $V = 0,01 \dots 0,05$ мм/с разницы в измерениях коэффициента трения не фиксируется и дальнейшее уменьшение скорости смещения не требуется.

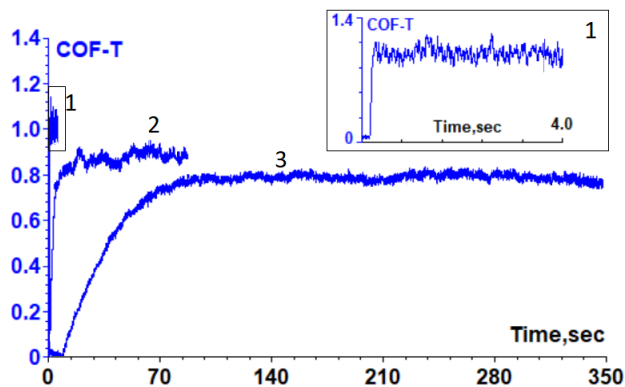


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от времени испытания для образца 1-го типа при $Q = 46,8\text{Н}$, где 1 – $V = 10$ мм/с, 2 – $V = 0,16$ мм/с и 3 – $V = 0,01$ мм/с

Путь трения образца был задан равным $\frac{1}{4}$ оборота (37 мм). Такой путь трения позволяет достоверно измерить коэффициент трения и избежать изнашивания и засаливания резиной поверхности тротуарной плитки.

Близкая и более подробная процедура испытаний, но с резиновым контробразцом, изготовленным из протектора шины легкового автомобиля изложена в [5].

Результаты и обсуждение

Полученные результаты измерения параметров шероховатости поверхности образцов приведены в сводной табл. 1. Анализ результатов показывает, что одномерные высотные параметры шероховатости Ra и Rz измеренные в 5 местах случайным образом занижают значения реального среднеарифметического отклонения профиля Ra (Sa) и наибольшей высоты профиля Rz (Sz). Поэтому измерение шероховатости по стандарту ГОСТ Р ИСО 25178 предпочтительнее, чем по ГОСТ 2789-73.

Поверхность образцов после дробеструйной обработки имеет грубую, развитую шероховатость, для которой среднеарифметическое отклонение оцениваемого профиля Sa (эквивалент Ra в 2D-измерениях) составляет 139,7 мкм, а параметр Sz ,

определяющий максимальную высоту профиля (эквивалент Rz в 2D-измерениях), равен 2261,5 мкм. При этом асимметричность оцениваемого профиля Ssk – параметр, который показывает преобладание пиков или впадин в профиле, составляет $-0,39$ мкм, то есть профиль поверхности после дробеструйной обработки характеризуется небольшим преобладанием впадин над пиками ($Ssk < 0$). Следует отметить, что значение эксцесса Sku при дробеструйной обработке равно 3,52, что близко к величине эксцесса ($Sku = 3$) характерному для нормального (Гаусса) распределения, другими словами, полученный профиль близок к случайному распределению шероховатостей на поверхности со среднеквадратичным отклонением оцениваемого профиля $Sq = 177,3$ мкм.

В данной работе дополнительно к высотным параметрам шероховатости приводится гибридный параметр профиля Sdq (эквивалент Rdq в 2D-измерениях), который определяет среднеквадратичный угол наклона шероховатостей оцениваемого профиля. Согласно данным источника [6], чем больше параметр Sdq , тем больше ожидается трение на такой поверхности. Для образцов после дробеструйной обработки значение Sdq составило 1,29.

Анализ результатов измерений параметров шероховатости поверхности образца после обработки поверхности шлифованием показал, что высотные и гибридные параметры шероховатости оцениваемого профиля для образца второго типа значительно снизились и составили $Sa = 66,7$ мкм, $Sz = 1524,5$ мкм, $Ssk = -1,38$ мкм, $Sq = 87,5$ мкм, $Sdq = 0,72$. При этом величина Sku увеличилась до значения 7,41, что свидетельствует о преобладании шипов в распределении шероховатостей по высоте. Для увеличения концентрации напряжения в поверхностном слое резинового контртела и, как следствие, повышения сцепления увеличение параметра Sku выгодно, однако в нашем случае из-за шлифования большие и маленькие шипы неровностей направлены вниз (о чем свидетельствует снизившейся параметр Ssk), что не способствует увеличению деформационного механизма трения, который является важным при наличии грязи или воды на поверхности тротуарной плитки.

Табл. 1. Параметры шероховатости поверхности образцов

Вид обработки	Одномерные параметры по ГОСТ 2789-73 (мкм)		Трёхмерные параметры по ГОСТ Р ИСО 25178 (мкм)					
	Ra	Rz	Sa	Sz	Sq	Ssk	Sku	Sdq
Дробеструйная	133,5	1067	139,7	2261,5	177,3	-0,3921	3,5175	1,2854
Шлифование	66,1	524	66,7	1524,5	87,52	-1,3818	7,4100	0,7223

Подводя итог анализа параметров шероховатости поверхностей исследуемых образцов, можно сделать вывод: шлифование поверхности тротуарных плит приводит к снижению микрошероховатости, а, следовательно, к уменьшению деформационного механизма трения, сохранение и даже повышение которого важно в условиях наличия загрязнений между контактирующими поверхностями. Отметим, что большинство природных загрязнений (дорожная пыль, грязь) или наличие воды (дождь) на поверхности тротуарных бетонных плит приводит к не существенному снижению адгезионного механизма трения, который превалирует в контакте резины с поверхностью. Поэтому шлифование поверхности тротуарной плиты не так значительно снижает коэффициент сцепления, однако при наличии технической жидкости (например, моторное масло) снижение сцепление на шлифованной поверхности будет выше, чем на поверхности после дробеструйной обработки.

Приведем анализ исследования влияния температура и нормальной нагрузки на статический коэффициент трения, измеренные значения которого были сведены в табл. 2. Отметим, что вычисление значений коэффициента трения проводилось на участке с установившемся трением.

Табл. 2. Статический коэффициент трения

Вид обработки	$T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	$P=0,04\text{ МПа}$	$P=0,4\text{ МПа}$	$P=0,04\text{ МПа}$	$P=0,4\text{ МПа}$
Дробеструйная	0,81	0,9	0,94	1,17
Шлифование	0,69	0,76	0,60	0,80

Как легко видеть увеличение удельной нагрузки в 10 раз приводит к увеличению коэффициента трения. Данное поведение характерно для трения резины по шероховатой поверхности. Следует отметить, что для трения резины по гладкой поверхности является характерным снижение коэффициента трения с увеличением нагрузки, что объясняется влиянием адгезионного механизма трения, который превалирует в сухом контакте резины с гладкой поверхностью [7].

При снижении температуры до $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ статический коэффициент трения увеличивается, что в основном характеризует высокоэластичные свойства резины полуботинка модели Премиум 1302ПК, которые максимальны при пониженных температурах.

Отметим, что вследствие износа заданная при изготовлении шероховатость может снизиться, поэтому одним из возможных способов повышения

сцепных свойств может являться введение в состав тротуарной плитки наполнителей с высокими адгезионными свойствами, который сохраняются при отрицательных температурах, например, морозостойкие полимеры.

Следует отметить, что повышение способности отвода воды из контакта (например, за счет пористости тротуарной плиты) позволит сохранить высокие сцепные свойства, характерные для сухого контакта.

Заключение

Для увеличения сцепных свойств поверхности тротуарной плиты предпочтительно создавать шероховатость на ее поверхность в форме остроконечных пиков, то есть увеличение высотных (S_a , S_{sk} , S_{ku}) и гибридного S_{dq} параметров шероховатости ведет к увеличению сцепных свойств поверхности.

Результаты проведенных испытаний показали не значительное снижение статического коэффициента трения в сравнении с поверхностью с дробеструйной обработкой. При этом специалистами ООО «Бекам» (Фабрика «Готика») при практической эксплуатации мощенных площадей фиксируется легкое удаление грязи, снега, воды и льда с поверхности шлифованной плитки, то есть с точки зрения эксплуатации гладкая шлифованная поверхность имеет значительные преимущества.

Авторы благодарны ООО «Бекам» (Фабрика «Готика») за предоставленные образцы.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4).

[1] Трение и смазка твёрдых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; Перевод с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина; Под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.

[2] Barber J.R. Contact Mechanics; Publisher: Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2018. – 585 p.

[3] Резяпкин И. Важные «мелочи» при расчете конструкций дорожных одежд с покрытием из камней/плит мощения // Про мощение. – 2019. – № 11. – С. 11-12.

[4] Savkor A.R. On the friction of rubber // Wear. – 1965. – № 8. – P. 222-237.

[5] Морозов А.В., Буковский П.О. Влияние способа обработки поверхности тротуарной плитки на коэффициент трения с резиной // Каучук и резина. – 2022. – Т. 81. – № 1. – С. 48-52.

[6] Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения: от нанотрибологии до динамики землетрясений Физматлит, 2013. – 351 с.

[7] Морозов А.В., Петрова Н.Н. Методика оценки коэффициента трения уплотнительных морозостойких резин // Трение и износ. – 2016. – Т. 37. – № 2. – С. 162-167.

К ВОПРОСУ ОБ УЧЁТЕ ТРЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ РЕСУРСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

^{1,2}Москвитин Г.В. *, ^{1,2}Навроцкий Р.А., ²Полежаев Э.Р.

*E-mail: gvmoskvitin@yandex.ru

¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

²МАИ (НИУ), Москва, Россия.

В докладе рассмотрены вопросы прогнозирования ресурса зубчатых колес редукторов по критериям контактной усталости с учетом трения скольжения, возникающего в зубчатых зацеплениях взаимодействующих колес. При проведении данного исследования были использованы результаты работ видных трибологов страны, таких как профессора Семенов А.П., Крагельский И.В., Дроздов Ю.Н. и др., согласно которым ответственными за накопление повреждений в трущихся зубьях являются не только нормальные, но и касательные напряжения. В настоящей работе для оценки значений этих напряжений использованы пакеты современных прикладных программ на базе МКЭ. Эффективность данного подхода продемонстрировано на примере зубчатых колес, изготовленных из пластмасс и с применением аддитивных технологий.

Ключевые слова: редукторы, зубчатые колеса, ресурс, усталостные повреждения, трение скольжения, нормальные и касательные напряжения, критерии контактной усталости, аддитивные технологии, численное моделирование НДС.

Введение

Зубчатые колеса (ЗК) являются ключевым элементом редукторов всех типов, за счет них реализуется передача и преобразование механической энергии. Данные конструкции применяются во всех отраслях машиностроения: тяжелом, станкостроении, автомобилестроении, авиастроении и т.д. Создание ЗК для различных отраслей промышленности, а также оценка прочности и ресурса данных изделий регламентируются соответствующими нормативными документами, которые совершенствуются по мере получения новых результатов исследований. Несущая способность ЗК определяется многочисленными конструктивно-эксплуационными параметрами, такими как геометрия, свойства материала, история нагружения, технология изготовления, вибрации, трение в контактирующих поверхностях, вид зацепления (эвольвента) и т.д.

ACCOUNTING FOR THE FRICTION COEFFICIENT IN THE STUDY OF SSS OF GEAR WHEELS THAT CAN BE CREATED WITH THE HELP OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

Moskvitin G.V., Navrotskiy R.A., Polezhaev E.R.

The report has contained the issues of predicting the resource of the gearwheels of reduction gear according to the criteria of contact fatigue, taking into account the sliding friction that occurs in the gearing of the interacting gearwheels. In carrying out this study, the results of the work of prominent tribologists of the country, such as Semenov A.P., Kragelsky I.V., Drozdov Yu.N., and others, were used. According to these results not only normal, but also shear stresses are responsible for the accumulation of damage in rubbing teeth. In this work, packages of modern applied programs based on the FEM were used to estimate the values of these stresses. The effectiveness of this way is demonstrated on the example of gearwheels made of plastics and using additive technologies.

Keywords: reduction gear, gearwheels, resource, fatigue damage, rolling friction, normal and shear stresses, contact fatigue criteria, additive technologies, numerical simulation of SSS.

Изучению несущей способности ЗК посвящены многочисленные исследования российских и иностранных учёных. Одной из работ, в которой последовательно раскрывается проблема оценки контактной усталости ЗК с учетом трения является работа [1]. Дальнейшее изложение проведем именно на основе данной работы.

Материалы и методы

В данной работе на основе результатов собственных исследований, а также на основе исследований других авторов, в том числе тех, которые приведены в аннотации, утверждается, что нормальные контактные напряжения на основные виды разрушения зубчатых передач влияют не напрямую, а косвенно. Считается, что именно касательные напряжения, действующие в зонах контакта, приводят к возникновению и дальнейшему распространению разрушений. Касательные напряжения растут по величине при

отдалении зоны контакта от полюсной линии зуба, что и может привести в конечном итоге к появлению усталостных трещин.

Таким образом, согласно этому исследованию необходимо получить величины максимальных касательных напряжений, которые предлагается определять по следующей формуле:

$$\tau_{max n} = c_1 \sigma_{Hr}, \quad (1)$$

где σ_H – наибольшие нормальные контактные напряжения, $\tau_{max n}$ – максимальные поверхностные касательные напряжения, c_1 – коэффициент приведения нормальных контактных напряжений к максимальным поверхностным касательным напряжениям, который определяется следующим образом:

$$c_1 = 0.8 \sqrt{(1.5f_{сц} - f)^2 + 2.4f_{сц}f}, \quad (2)$$

где f – максимальный коэффициент сцепления на расчетном участке поверхностей зубьев, $f_{сц}$ – расчетный коэффициент сцепления.

Коэффициент сцепления может быть определен следующим образом:

$$f_{сц} = \frac{AP_n^{0.1} \left[10 + \lg \left(\frac{HB R_a}{E_{np} R_{np}} \right) \right]}{v_k^{0.07} (v_1 + v_2)^{0.1} (v_1 - v_2)^{0.35} R_{np}^{0.25}}, \quad (3)$$

где A – размерный коэффициент; P_n – нагрузка на единицу длины, HB – твердость менее твердого из контактирующих тел, R_a – шероховатость, E_{np} – приведенный модуль упругости, R_{np} – приведенный радиус кривизны, v_k – вязкость смазки при температуре вступающих в контакт поверхностей, v_1 и v_2 – окружные скорости ведущего и ведомого звеньев, соответственно.

Наибольшие нормальные контактные напряжения σ_H определяются по формуле:

$$\sigma_H = Z_H Z_E Z_\varepsilon \sqrt{\frac{\omega_H t u + 1}{d_{\omega 1} u}}, \quad (4)$$

где Z_H , Z_E , Z_ε – коэффициенты, учитывающие форму сопряженных поверхностей зубьев, механические свойства материалов сопряженных зубчатых колес, суммарную длину контактных линий соответственно; $d_{\omega 1}$ – начальный диаметр шестерни; u – передаточное число; ω_H – удельная расчетная окружная сила. Здесь знак «+» в случае внешнего зацепления, а знак «-» для внутреннего.

Допускаемые максимальные контактные напряжения определяются следующим образом:

$$\sigma_{Hr} = \frac{\sigma_{H \lim b}}{S_{H \min}} Z_R Z_v Z_L Z_x, \quad (5)$$

где Z_R – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности; Z_v – коэффициент, учитывающий влияние окружной скорости; Z_L – коэффициент, учитывающий влияние смазки (1 – отсутствие смазки); Z_x – коэффициент, учитывающий влияние размеров колеса (1 для $d < 700$ мм).

Допускаемые максимальные касательные напряжения можно определить по допускаемым максимальным контактным напряжениям:

$$[\tau_{max n}] = c_2 c_3 \sigma_{Hr}, \quad (6)$$

где c_2 – коэффициент пропорциональности допускаемых напряжений; σ_{Hr} – допускаемые нормальные контактные напряжения; c_3 – коэффициент надежности, определяемый в зависимости от вероятности безотказной работы.

Таким образом, в соответствии с [1] и положениям, изложенным выше, можно записать следующее условие безаварийной эксплуатации ЗК, которое может использоваться для проверочного расчета на контактную усталость активных поверхностей зубьев ЗК (цилиндрических передач) с учетом трения:

$$\tau_{max n} \leq [\tau_{max n}]. \quad (7)$$

Следует, однако, отметить, что представленные выше формулы для вычисления касательных и контактных напряжений, коэффициента сцепления и др. параметров ЗК носят приближенный характер (при их выводе использованы упрощенные подходы сопротивления материалов), в частности, по ним невозможно построить поля касательных и нормальных напряжений, их интенсивностей и т.д.

В связи с отмеченным, представляет интерес использовать для определения необходимых для использования критерия (7) значений напряжений альтернативных подходов, в частности, различных инженерных программных комплексов на базе МКЭ. Данные методы оценки нормальных и касательных напряжений во многих случаях могут предоставить более точные и корректные значения (например, в условиях сложной геометрии изделия или усовершенствованной модели используемого материала) и, в тоже время, лишены недостатков, указанных выше. Этому вопросу и посвящена данная работа. В качестве объекта исследования были рассмотрены некоторые типоразмеры ЗК, изготовленных из пластмасс и по аддитивной технологии.

Использование пластмассовых ЗК открывает перспективу их производства при помощи аддитивных технологиях на 3D-принтерах. Такой

способ производства позволяет изготавливать детали разной степени геометрической точности, использовать новейшие материалы с высокими механическими характеристиками, сокращать различные ресурсные затраты самого производства и комбинировать вещества-наполнители.

С помощью пакетного комплекса Ansys Workbench было проведено исследование напряженного состояния зацепления двух ЗК, которые возможно изготовить из ABS-пластика на 3D-принтере. Исследование включало в себя несколько этапов:

1. Задание свойств материала (ABS-пластика) с использованием результатов работы [2];

2. С помощью инструментов DesignModeler и SpaceClaim создание геометрической модели колес (рис. 1);

3. Генерация конечно-элементной модели (рис. 2) при помощи блока Mesh (с учетом увеличения частоты сетки при приближении к зоне контакта);

4. Моделирование нагрузок и ограничений. В качестве силового фактора задействован крутящий момент на внутренней поверхности ступицы; на валы наложены Frictionless Support для шестерни и Remote Displacement для колеса;

5. С помощью решателя (расчетный блок StaticStructural) определялись значения нормальных и касательных напряжений (табл. 1), а также, распределения их значений по геометрической модели [3].

Табл. 1. Результаты численного исследования

	Зона контакта зубьев	Основания зубьев	Максимальные значения
σ_n , МПа	1,12 – 13,3	1,12 – 8,48	13,3
τ_{max} , МПа	1 – 9,7	1 – 4,15	12,46

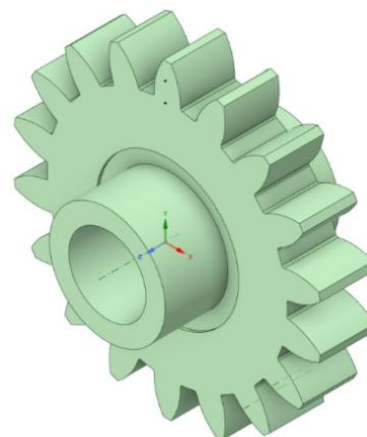


Рис. 1. Геометрическая модель зубчатого колеса

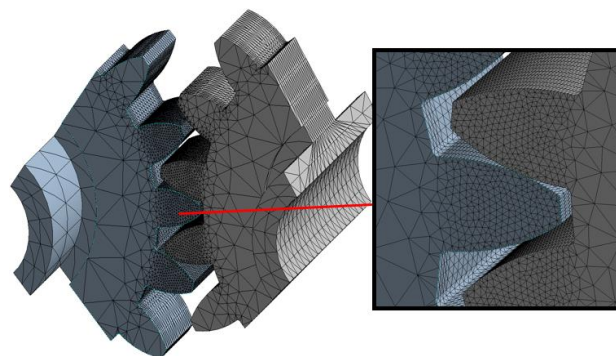


Рис. 2. Конечно-элементная модель зубчатого колеса

Результаты и обсуждение

В ходе численного исследования были определены максимальные нормальные контактные напряжения, значения которых находятся в диапазоне от 1 до 14 МПа в зонах контакта зубьев и до 8,5 МПа у основания зубьев (рис. 3). Также, определены максимальные касательные напряжения, значения которых доходят до 10 МПа в зонах контакта зубьев и до 5 МПа у основания зубьев (рис. 4).

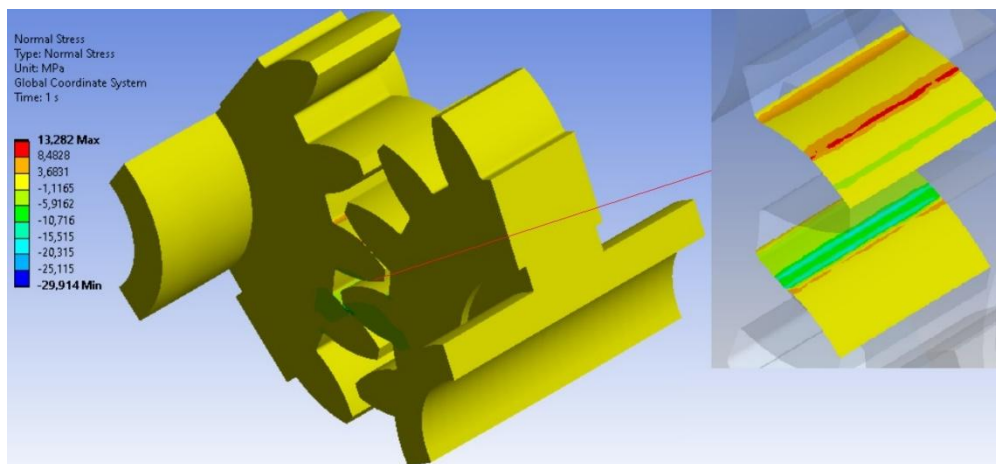


Рис. 3. Нормальные контактные напряжения

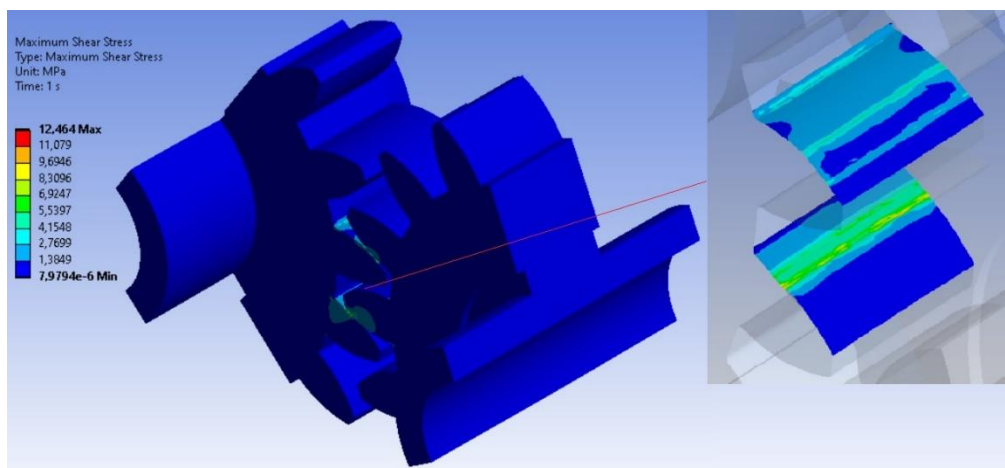


Рис. 4. Касательные напряжения

Заключение

Представлены основные положения и последовательность оценки ресурса ЗК по критериям контактной усталости с учетом трения и приведены основные инженерные зависимости, необходимые для проведения проверочных расчетов.

Обосновано применение для оценки величин касательных и нормальных напряжений, необходимых для использования критерия контактной усталости ЗК, численных методов исследования, в ряде случаев являющимися более точными и информативными по сравнению с результатами прямого использования соответствующих формул работы [1].

Перспективы дальнейших исследований

С учетом достаточно высокой актуальности проблемы прочности и ресурса ЗК предполагается продолжить исследования, результаты которого изложены в настоящей статье по следующим направлениям:

1. Проведение сравнительного анализ результатов расчета величин нормальных и касательных напряжений в ЗК, полученных с применением формул работы [1] и с использованием пакетов на базе МКЭ;

2. Проведение сравнительного анализа значений ресурса ЗК по критериям контактной усталости с использованием значений напряжений, указанных в предыдущем пункте, а также с применением результатов испытаний образцов АБС-пластика на сопротивление циклическому нагружению с построением кривой Веллера;

3. С использованием результатов упомянутого выше расчетно-экспериментального исследования вывод уточненных формул для оценки нормальных и касательных напряжений, а также значений ресурса;

4. Проведение оценки влияния на экономическую составляющую и изменение ресурсных затрат на производство ЗК от использования предложений настоящей работы;

5. Для подтверждения правильности и оценки точности основных положений, полученных в настоящей работе, необходимо создание полноценных моделей ЗК с использованием аддитивной технологии и проведение соответствующих экспериментов по определению прочности и контактной усталости.

[1] Проектирование зубчатых передач на долговечность с учетом трения / Ю.В. Воробьев, А.Д. Ковергин. - Машиностроение. Строительство. Материаловедение. Металлообработка. Вестник ТГТУ. 2004. – Т. 10. – С. 205-211.

[2] Исследование деформационно-прочностных свойств АБС пластика при печати деталей на 3D принтере / Наумов О.В., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Поляков А.Н. - XXVII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2015). Сборник трудов конференции. 2015. – С. 57-60.

[3] Инженерный анализ в ANSYS Workbench / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов, Самара: Самар.гос.техн.ун-т, 2010. – 271 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ПРОГРАММЕ QFORM ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И УСЛОВИЙ ТРЕНИЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ ПОКОВКИ «ПОДШИПНИК»

Мышечкин А.А. *, Скрипник С.В., Белоусов И.В.

*E-mail: myshechkin@mirea.ru

РТУ МИРЭА, Москва, Россия.

При помощи моделирования в компьютерной программе QForm исследована технология горячей объёмной штамповки детали типа «Подшипник». Исследованы технологические параметры и их влияние на силовые параметры и условия трения. Определена оптимальная геометрическая форма исходной заготовки, обеспечивающей минимальные усилия штамповки, оптимальные условия заполнения полости штампа. Определены оптимальные переходы штамповки.

Ключевые слова: программа QForm, моделирование, силовые параметры, трение, температура, напряжения, горячая штамповка деформации.

Введение

В настоящее время развитие и совершенствование процессов горячей объёмной штамповки идет по пути повышения их технологической эффективности, эксплуатационных свойств изделий. При этом для получения поковок все более широкое применение находят новые металлы и сплавы с различными механическими характеристиками. Для повышения эффективности технологического процесса необходимо, за счет оптимизации технологических параметров, снижать отходы металла, дефектообразование поковок, повышать точность и качество поверхности поковки, снижать технологические усилия. Однако при разработке технологических процессов горячей штамповки большая часть технологических параметров выбирается на основе опыта специалистов и, вследствие сложности таких процессов, выбрать оптимальные параметры бывает затруднительно. Одним из методов ускорения разработки и оптимизации технологических процессов является использование методов компьютерного моделирования. В последнее время активное применение находит программный комплекс QFORM, позволяющий моделировать

INVESTIGATION BY MODELING IN THE QFORM PROGRAM OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS AND FRICTION CONDITIONS DURING HOT STAMPING OF THE FORGING "BEARING"

Myshechkin A.A., Skripnik S.V., Belousov I.V.

With the help of modeling in the QForm computer program, the technology of hot volumetric stamping of a part of the "Bearing" type is investigated. Technological parameters and their influence on force parameters and friction conditions are investigated. The optimal geometric shape of the initial blank is determined, providing minimal stamping efforts, optimal conditions for filling the die cavity. Optimal stamping transitions are determined.

Keywords: QForm program, modeling, force parameters, friction, temperature, stresses, hot stamping deformation.

течение металлов в полости штампов с учетом действия различных технологических параметров [1,2].

Целью данной работы является исследование при помощи моделирования технологии и условий трения при штамповке сложных поковок. А также оптимизация технологических переходов и снижения силовых параметров процесса.

Материалы и методы исследования

Исследование технологического процесса проводили на детали типа «Подшипник», показанной на рис. 1. Материал поковки – сталь ШХ15.

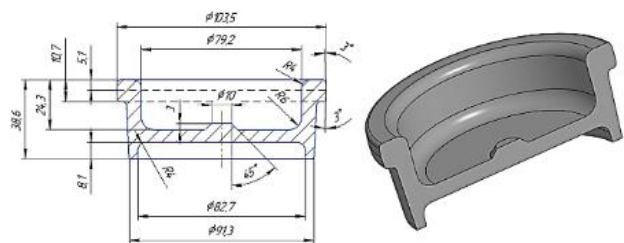


Рис. 1. Поковка «Подшипник»

При разработке технологического процесса [3] вначале были определены размеры исходной

заготовки: $D_3 = 50\text{ мм}$, $L_3 = 68\text{ мм}$. Для удаления окалины, выравнивания торцев заготовки и оптимизации течения металла при последующем формообразовании поковки исходная заготовка вначале подвергается осадке до высоты 25 мм. Температура нагрева выбрана $1150\text{ }^\circ\text{C}$. Исследовалось и влияние смазки на условия трения и ход самой штамповки.

Анализ технологических процессов получения поволоков данного типа показывает, что для получения таких поволоков целесообразно использовать предварительный ручей для получения заготовки в виде чашки. Для оптимизации течения материала в окончательном ручье штампа донную часть чашки необходимо выполнить выпуклой с формой, наиболее близкой к сферической. Отличительной особенностью является неравномерная толщина донной части. Толщина уменьшается по направлению от периферии к центру детали (рис. 2). Изменение толщины донной части снижает технологическое усилие при штамповке на последнем переходе. В процессе исследования технологического процесса установлено, что оптимальное значение толщины донной части составляет $S = 4,0\text{ мм}$. Изучение направлений течения металла показывает, что на последнем переходе формоизменения поковки металл в донной части перемещается от периферии к центру.

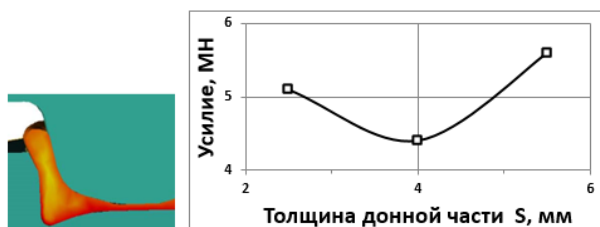


Рис. 2. Влияние толщины в донной части поковки в предварительном ручье на усилие окончательного формоизменения поковки в окончательном ручье

На основе проведенных исследований технологического процесса горячей штамповки для оптимизации процесса течения деформируемого металла в полости штампа предложено в поковке создать дополнительный карман (компенсатор избыточного металла) диаметром около 10 мм и высотой около 3 мм.

При разработке и исследовании процесса горячей объемной штамповки поковки «Подшипник» с целью выбора оптимальных параметров вначале в заданном редакторе подготовлена технологическая оснастка [1], далее из базы данных QForm выбраны необходимые

исходные данные: температура нагрева деформируемого металла и его механические характеристики, материал, температура подогрева и условия остановки инструмента, условия трения и применяемая смазка, вид и параметры технологического оборудования. В качестве смазки выбран раствор графита на основе воды. На основе практического опыта температура подогрева инструмента принята $200\text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты и обсуждение

Использование компенсатора избыточного металла в виде кармана в донной части позволило оптимизировать течение металла и снизить технологическое усилие штамповки. Выбор оптимальных параметров процесса позволил также уменьшить размер заготовки. На основе анализа течения металла и формообразования поковки высота заготовки принята равной 62,5 мм.

Моделирование технологического процесса показало, что технологическое усилие предварительной штамповки составляет 1,55 МН. Температура поковки составила $1150 \div 910\text{ }^\circ\text{C}$. Максимальное усилие окончательного формоизменения поковки, при изменении толщины донной части в пределах 2,5-5,5 мм, составляет $4,4 \div 5,5\text{ МН}$. Донная часть выпуклой формы с переменной толщиной 4,0 мм и наличие компенсатора позволяет обеспечить рациональное распределение деформаций по телу поковки и значительно уменьшить усилие в окончательном ручье. Суммарная пластическая деформация при формообразовании поковки находится в пределах $+13,3 \div +1,4$. Гидростатическое давление по сечению поковки находится в пределах $+57 \div -1470\text{ МПа}$. Отметим, что растягивающие напряжения находятся в заусенце, а максимальные сжимающие напряжения находятся в центре дна поковки. Температура поковки по сечению находится в пределах $1130 \div 840\text{ }^\circ\text{C}$. Геометрические параметры получаемой поковки после изменения размеров заготовки соответствует требованиям.

В дальнейшем, на основе проведенных исследований и анализа характера напряженно-деформированного состояния металла и поля скорости деформации для снижения максимального усилия в последний момент штамповки, предложено отказаться от компенсатора в донной части поковки, но увеличить глубину кольцевой полости в нижней части штампа, которая будет выполнять функции компенсатора.

В этом случае в последний момент штамповки избыток металла вытесняется в эту полость, т.е. размер поковки по высоте увеличивается. Такой

компенсатор удаляется при последующей механической обработке детали. Готовая поковка с компенсатором в цилиндрической части и штамп для окончательного формоизменения показаны на рис. 3. Высота поковки с компенсатором в этом случае составляет около $43 \pm 0,5$ мм.

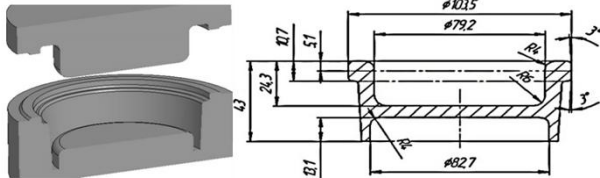


Рис. 3. Штамп для окончательного формоизменения и готовая поковка с компенсатором в цилиндрической части поковки

Силовые параметры и напряженно деформированное состояние исследовалось при толщине донной части в предварительном ручье $S = 2,5-5,5$ мм. Характер изменения усилия окончательного формоизменения, напряженно-деформированное состояние и температура по сечению поковки при $S = 2,5$ мм показаны на рис. 4. Изменение усилия в последний период штамповки происходит более плавно. Накопленная пластическая деформация по сечению поковки находится в пределах $+4,80 \div +1,25$. Среднее напряжение находится в пределах $+8,8 \div -681$ МПа, при этом растягивающие напряжения имеют меньшее значение в сравнении с расположением компенсатора в донной части и находятся только в компенсаторе в цилиндрической части, максимальные сжимающие напряжения – в центре донной части. Температура по сечению поковки находится в пределах $1100 \div 860$ °С. Было проведено также моделирование процесса при толщине донной части $S = 4,0$ мм и $S = 5,5$ мм.

В результате исследований влияния толщины донной части поковки на технологические параметры установлено, что при увеличении толщины происходит изменение схемы напряженного состояния по сечению поковки и при $S = 5,5$ мм в поковке действуют только сжимающие напряжения, что повышает пластичность металла. Снижается также разность температур по сечению поковки.

Исследования влияния сил трения и смазки на силовые параметры технологического процесса штамповки различных поковок показывают, что силы трения составляют 25-33% от общего усилия штамповки. При этом на основе исследований установлено, что при горячей штамповке оптимальные условия трения и охлаждение

инструмента обеспечивает смазка на основе водного раствора графита. При использовании данной смазки снижается охлаждение поковки и нагрев инструмента.

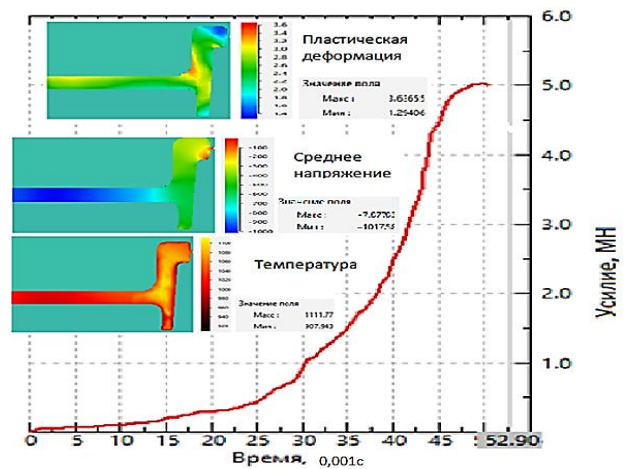


Рис. 4. График изменения усилия и показатели напряженно-деформированного состояния при окончательном формоизменении поковки с компенсатором в кольцевой полости

Экспериментальное исследование штамповки детали типа «Подшипник» подтвердило результаты компьютерного моделирования. Экспериментальное усилие соответствует данным моделирования. Полученная поковка имеет четко оформленный контур, дефектов в своём теле не имеет.

Заключение

Методом компьютерного моделирования разработан и исследован технологический процесс и условия трения при горячей штамповке поковки «Подшипник». Определено, что технологический процесс включает осадку, предварительную штамповку прошивкой с образованием выпуклой донной части и окончательную штамповку.

Определены параметры для оптимального протекания технологического процесса. Установлены распределение температуры, условия трения, разных типов деформаций и напряжений, позволяющие получить поковку высокого качества.

[1] Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие под ред. А.В. Власова /А.В. Власов, С.А. Стебунов, С.А. Евсюков, Н.В. Биба, А.А. Шитиков. -М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.

[2] Мышечкин А.А., Морозов Ю.А. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки «Фланец» моделированием в программе QForm// Инновационные технологии в электронике и приборостроении: Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. - М.: РТУ МИРЭА. – 2020. – Т. 2. – С. 153-159.

[3] Семенов Е.И. Ковка и объемная штамповка. М.: Высшая школа, 1972. – 350 с.

ЗЕЛЕНАЯ ТРИБОЛОГИЯ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Мышкин Н.К. *, Григорьев А.Я.

*E-mail: nkmyshkin@mail.ru

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь.

Концепция целей устойчивого развития разработана Генассамблеей ООН. Трибология стала одним из факторов достижения этих целей в области промышленности и инноваций. Потери, связанные с трением и износом машин, для промышленно развитых стран оценивают в значительную долю валового национального продукта. Рассмотрена реализация экологически эффективной (зеленой) трибологии в разработке полимерных композитов и смазок на растительной основе для снижения потерь материалов и энергии в узлах трения.

Ключевые слова: устойчивое развитие, трибология, полимеры и композиты, растительные масла.

Введение

Статья посвящена 100-летию со дня рождения и памяти одного из виднейших трибологов России профессора Александра Павловича Семенова, видного представителя школы Института Машиноведения. Эта дата совпадает со столетием со дня рождения В.А.Белого, основателя ИММС НАНБ и журнала «Трение и износ». Они были знакомы лично, и профессор Семенов участвовал в первом международном симпозиуме «О природе трения твердых тел в Гомеле в 1969 году. Он неоднократно публиковался в журнале «Трение и износ», и активно с ним сотрудничал в качестве члена редакционного совета.

Потери, связанные с трением и износом машин, для промышленно развитых стран оценивают в 3–5% валового национального продукта, а из потребляемой промышленностью энергии около четверти расходуется на преодоление сил трения [1, 2]. Снижение этих потерь, снижение вредных выбросов двигателей, применение экологически-чистых смазок может служить достижению целей устойчивого развития, определенных ООН.

В речи профессора Питера Джоста на приеме в Букингемском дворце в Лондоне, организованном Принцем Филиппом, патроном британских технических обществ (2.03.016) он отметил аспекты развития трибологии. Питер Джост сказал: «Трибология уже стала «зеленой» и я надеюсь, что университеты и научные центры успешно внедрят

GREEN TRIBOLOGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Myshkin N.K., Grigoriev A.Ya.

Concept of Sustainable Development Goals developed by United Nations includes topic of industry and innovation where tribology, is very important. The losses connected with friction, wear, and energy in machines are estimated by significant portion of the GNP. The efficient way to decrease losses in energy and materials is to replace the metal parts of machinery and vehicles with composite components based on polymers. The promotion of plant oils instead of the mineral ones is also important.

Keywords: Sustainable development, tribology, polymers and polymer composites, plant oils.

разработки в производство, защиту окружающей среды, сокращение затрат энергии и материалов, ... для обеспечения качества жизни будущих поколений...” [1].

Полимеры в трибологии

Одним из важных направлений в зеленой трибологии является широкое использование полимеров для замены металлов в узлах трения и конструктивных элементах машин [3]. В начале нынешнего века мировой объем выпуска полимеров превысил объем выпуска металлов. Стойкость к коррозии и низкий коэффициент трения полимеров, обеспечивают им постоянное расширение сфер применения [4]. Традиционные термопластичные полимеры обладают самосмазываемостью и широко используются в подшипниках скольжения. Термореактивные полимеры служат основой материалов для тормозов и сцеплений. Наиболее важные области применения эластомеров — автомобильные шины, являющиеся одновременно и ключевыми элементами автомобилей и одним из главных источников потерь энергии в транспорте.

Полимерные композиты благодаря своей многофункциональности стали областью интенсивных исследований и разработок в трибологии [4]. Композиты с нанонаполнителями захватывают области, занимаемые другими материалами на основе полимеров. Особенно интересны полимер-силикатные нанокompозиты, имеющие относительно низкую стоимость, так как

сырье для них имеется в природных месторождениях глин.

С точки зрения прикладных инженерных приложений необходима оценка трибологических характеристик перспективных нанокомпозитов на основе. Такое тестирование было проведено для двух типов нанокомпозитов на основе ПЭЭК [5] и они показали лучшие триботехнические характеристики в сравнении с известными композитами. Образцы с наночастицами SiO₂ и аттапульгита обладали более высокой нагрузочной способностью и фактором PV при стабильно низком коэффициенте трения и интенсивности изнашивания на пути скольжения около 70 км [6].

Очевиден принципиально различный механизм трения композита без нанодобавок и с ними. Если базовый композит имеет падающую зависимость коэффициента трения от давления, которая соответствует модели адгезионного механизма трения, то зависимости для композитов ПЭЭК с нанодобавками требуют модификации модели.

Данные испытаний показывают необходимость дальнейших исследований и прежде всего, представляется интересным детальная оценка влияния скорости скольжения на коэффициент трения, поскольку это сможет дать основу для разработки модели формирования плёнки фрикционного переноса для перспективных композитов с нанодобавками. Комбинированное добавление углеродных волокон, нановолокон и ПТФЭ обеспечивает синергическое улучшение характеристик полимерного композита на основе ПЭЭК [6]. Это, по-видимому, связано с образованием плёнок переноса, а эти плёнки и формирующиеся граничные слои (трибоплёнки) могут быть ключевым фактором в характеристиках трения полимерных нанокомпозитов.

Смазочные материалы

В развитии зеленой трибологии большое внимание уделяется и разработке смазочных материалов на основе природных полимеров.

До наступления XX-го века растительные и животные жиры были очень распространенными смазочными материалами. Развитие нефтепереработки и исследования в области химии присадок привели к вытеснению природных жиров и масел минеральными смазочными материалами. В конце прошлого века по требованиям экологов начались ограничения применения минеральных масел в сельском и лесном хозяйстве. Появились директивы ЕЭС по стимуляции использования растительных масел и сейчас более 150 марок

смазочных масел и рабочих жидкостей производятся из растительного сырья. Показано, что растительные масла по многим показателям не уступают минеральным. Они проявляют хорошие противоизносные и защитные свойства благодаря образованию трибополимерных пленок. Индекс задира этих масел зависит от молекулярной структуры и возрастает при их на поверхностях трения при испытаниях, способствуя трибохимическим реакциям в условиях повышения температуры и сдвиговых деформаций [7].

Заключение

Зеленая трибология в настоящее время оказывает важное влияние на достижение целей устойчивого развития техники и социальной сферы в различных областях человеческой деятельности. Можно с оптимизмом смотреть на достижения трибологии в использовании полимерных и смазочных материалов для снижения потерь энергии, материалов и экологически вредных выбросов в глобальном масштабе. При этом основными направлениями исследований и разработок могут стать полимерные композиты с природными компонентами и смазочные материалы на основе природного сырья, обладающие способностью к утилизации и рециклингу.

Работа выполнена при финансовой поддержке задания 4.2.3, НИР 1 подпрограммы «8.4 Многофункциональные и композиционные материалы» ГПНИ на 2022-2025 годы и Белорусского фонда фундаментальных исследований (номер проекта T21ЭТ-018).

- [1] P. Jost: Brief notes. In: Int. conference “50th anniversary of the “Jost report”, IMech, London, 2016. – С. 1-2.
- [2] Holmberg K. et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry //Tribology International. – 2017. – Т. 115. – С. 116-139.
- [3] Myshkin N.K., Grigoriev F.A. Green tribology for Sustainable Development Goals // Proceedings of I4SDG IFToMM Workshop, ed. by G. Quaglia, Springer, 2022. – С. 421-428.
- [4] Myshkin N.K., Pesetskii S.S., and Grigoriev A.Ya. Polymer Tribology: Current State and Applications // Tribology in Industry. — 2015 (37). – №. 2. – С. 284-290
- [5] ISO 6601: Plastics — Friction and Wear by Sliding — Identification of Test Parameters. — 2002.
- [6] Мышкин Н.К., Zhang G., Гуцев Д.М., Григорьев Ф.А., Wang W., Li G. Характеристики нанокомпозитов на основе ПЭЭК при трении по стали // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 3. – С. 350-357.
- [7] Myshkin N.K., Grigoriev A.Ya., Kavaliova I.N. Influence of Composition of Plant Oils on Their Tribological Properties // Tribology in Industry. – 2017. – Т. 39. – №. 2. – С. 207-210 DOI: 10.24874/ti.2017.39.02.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ЭЛАСТОМЕРНОГО УПЛОТНЕНИЯ С МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ СМАЗКОЙ

Палин Д.Ю. *, Топоров А.В.**

*E-mail: denis_palin@bk.ru , **E-mail: ironaxe@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», Иваново, Россия.

Работа посвящена повышению работоспособности уплотнительных устройств подшипниковых узлов за счет применения магнитного эластомерного материала, выступающего в качестве уплотняющего элемента герметизатора. Разработана экспериментальная установка по определению момента трения уплотнительных устройств. Представлена методика проведения эмпирических исследований по определению зависимости момента трения от скорости скольжения металлического вала. Обозначены дальнейшие перспективы экспериментальных исследований предложенного магнитного эластомерного уплотнения.

Ключевые слова: эластомерный материал, магнитная жидкость, момент трения, скорость скольжения, триботехнические характеристики.

Введение

В настоящее время в промышленности широко используются манжетные и кольцевые уплотнения, которым присущи как достоинства, так и недостатки. Известно, что уплотняющим материалом манжетных и кольцевых уплотнений служит резина, которая плотно прилегает к рабочей поверхности стального вала, обеспечивая работоспособность подшипникового узла и оборудования в целом. Однако в процессе эксплуатации уплотняющий материал из резины подвергается различным механическим воздействиям, вследствие чего быстро теряет свои эксплуатационные характеристики [1]. Таким образом, актуальным направлением является применение нового уплотняющего материала, которое будет обладать повышенными рабочими характеристиками. В качестве уплотняющего элемента предлагается использовать магнитный эластомерный материал, следовательно целью дальнейшего исследования будет являться определение его триботехнических характеристик.

INVESTIGATION OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF MAGNETIC ELASTOMERIC SEAL WITH MAGNETOFLUIDIC LUBRICANT

Palin D.Yu, Toporov A.V.

The work is devoted to improving the performance of sealing devices of bearing assemblies through the use of magnetic elastomeric material acting as a sealing element of the sealer. An experimental installation has been developed to determine the friction moment of sealing devices. A method of conducting empirical studies to determine the dependence of the moment of friction on the sliding speed of a metal shaft is presented. Further prospects of experimental studies of the proposed magnetic elastomeric seal are outlined.

Keywords: elastomeric material, magnetic fluid, friction moment, sliding speed, technical characteristics.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать экспериментальное оборудование для проведения исследований уплотнительных устройств;
- разработать опытный образец магнитного эластомерного уплотнения;
- экспериментально исследовать влияние скорости скольжения вала на момент трения и наличие утечек при различных условиях эксплуатации уплотнения.

Материалы и методы

Эмпирические исследования по определению момента трения уплотнительных устройств выполнялись при помощи разработанной экспериментальной установки, представленной на рис. 1.

Методика проведения экспериментального исследования включала в себя несколько этапов.

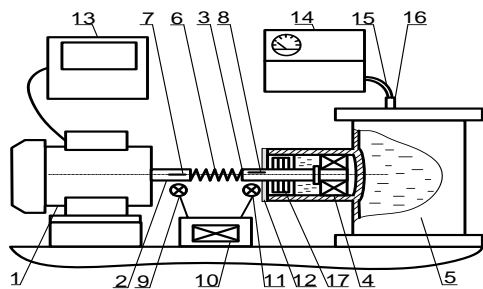


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1 – приводной электродвигатель; 2 – ведущий вал;
3 – ведомый вал; 4 – подшипник; 5 – бак; 6 – пружина;
7 – отражающий элемент; 8 – отражающий элемент;
9 – оптический датчик; 10 – блок управления; 11 – излучатель
светового потока; 12 – измерительная шкала; 13 – частотный
электропривод; 14 – компрессор; 15 – шланг; 16 – вентиль;
17 – уплотнительное устройство.

Первый этап: Разработано уплотнительное устройство, представленное на рис. 2.

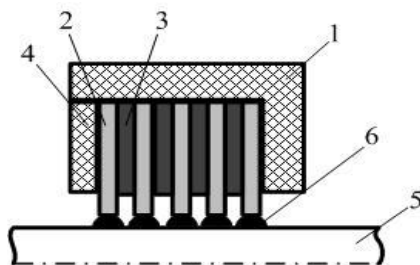


Рис. 2. Магнитожидкостное уплотнение

1 – корпус; 2 – магнитные эластомерные шайбы;
3 – шайбы из немагнитного материала; 4 – крышка; 5 – вал;
6 – магнитная жидкость.

Предложенное устройство состоит из корпуса 1, изготовленного из полимерного материала, в который устанавливались магнитные эластомерные шайбы 2. Между магнитными эластомерными шайбами 2 помещались шайбы из немагнитного материала 3. Шайбы фиксировались в корпусе при помощи крышки 4. Далее уплотнение устанавливалось на вал 5. Известно, что для пар трения «резина-металл» важно использовать смазочный материал, выступающий в качестве разделительной среды, так как он способствует снижению трения и повышению герметизации уплотнительного устройства. В рассматриваемом уплотнении в роли смазочного материала используется магнитная жидкость 6, которая удерживается при помощи пондеромоторных сил магнитного поля в области магнитных эластомерных шайб 2 и валом 5 [2].

Стоит отметить, что для наилучшей концентрации магнитных силовых линий в рабочей области магнитные эластомерные шайбы намагничены в осевом направлении и расположены одноименными полюсами друг к другу.

В качестве альтернативы исследовались триботехнические характеристики манжетного уплотнения.

Второй этап: Магнитожидкостное уплотнение заправлялось магнитной жидкостью типа МЖ-131. После чего в бак помещалась уплотняемая среда, в зависимости от характера планируемых испытаний. В качестве уплотняемой среды использовалось промышленное масло И-5, вода и воздух. Далее производилось включение питания приводного электродвигателя и устанавливалась необходимая частота вращения вала. В баке с помощью компрессора марки AUTOPROFI AP-040 нагнеталось необходимое давление. На измерительной шкале контролировался момент трения в уплотнении. В ходе эксперимента падение момента трения на измерительной шкале обосновывалось пробоем уплотнения, который фиксировался визуально по утечке уплотняемой среды.

Результаты и обсуждение

Перед началом эксперимента выполнялся процесс приработки уплотнительных устройств, который длился в течение 10 мин при частоте вращения вала 1000 об/мин. Результаты приработки представлены на рис. 3. в виде графика зависимости времени испытания от момента трения уплотнений.

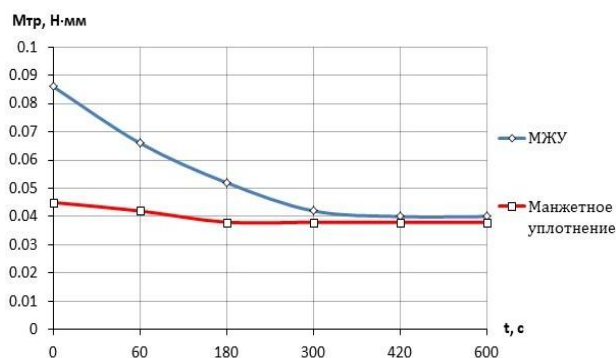


Рис. 3. График зависимости времени испытания от момента трения уплотнений

После процесса приработки уплотнительных устройств проводилось исследование зависимости момента трения от скорости скольжения вала. Результаты исследований были отражены на графике, представленном на рис. 4.

На графике показано, что с увеличением скорости скольжения вала и разных условиях работы $M_{тр}$ манжетного уплотнения падает. Это явление вызвано тем, что трущаяся поверхность кромки манжеты и вала отрывается от поверхности вала с дальнейшим образованием зазора между ними [3, 4].

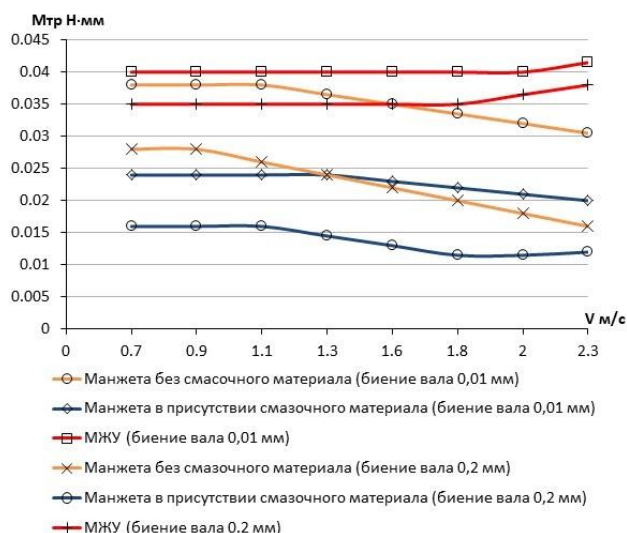


Рис. 4. График зависимости момента трения от скорости скольжения металлического вала

Кривые изменения момента трения для МЖУ, заправленного магнитной жидкостью, представленные на рис. 4., показывают, что величина момента трения для данного уплотнения на 40% выше, чем для традиционного герметизатора. Однако с увеличением скорости скольжения вала, Мтр магнитного эластомерного уплотнения не снижается, следовательно показатели работоспособности предложенного уплотнения значительно выше, чем у манжетного уплотнения. Кроме того, магнитная жидкость, которая выступает в роли смазочного материала, образует оболочку, которая препятствует проникновению уплотняемой среды через рабочий зазор трущихся поверхностей.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение зависимости момента трения от давления рассматриваемых уплотнений, а также проведении экспериментов износостойкости уплотняющих материалов.

Заключение

В ходе проведения экспериментального исследования зависимости момента трения уплотняющего элемента с металлическим валом выявлено, что предложенное магнитное эластомерное уплотнение обладает наилучшими триботехническими характеристиками. Кроме того, показано, что магнитная жидкость не только выполняет роль смазочного материала, но и дополнительно создает магнитожидкостные пробки, которые препятствуют утечке уплотняемой среды.

[1] Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / А.А. Кондаков [и др.]; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

[2] Пат. 197088 Российская Федерация, МПК(7) F16 J 15/00, F16 J 15/43. Магнитожидкостное уплотнение вала / Палин Д.Ю., Топоров А.В., Пучков П.В.; патентообладатель ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России – № 2019137911; заявл. 22.11.2019; опублик. 30.03.2020, Бюл №10. с. 5.

[3] Мельников О.М. Работоспособность соединений «вал-манжета» и повышение их надежности // Агроинженерия. – 2018. – №2 (84). – С. 50-54.

[4] Новоселов, Ю. К. Влияние состояния зоны контакта на работоспособность соединения «вал-манжета» / Ю.К. Новоселов, Б.Л. Шрон // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2014. – Вып. 46. – С. 33-36.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОКНОАРМИРОВАННЫХ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Панова М.О. *, Буяев Д.И., Шапошникова В.В., Соловьева В.А., Любимова А.С.

*E-mail: maxi4@list.ru

ФГБУН «Институт элементоорганических соединений РАН им. А. Н. Несмеянова», Москва, Россия.

В работе исследованы трибологические и физико-механические свойства композитов на основе резольных фенолформальдегидной и фенолфталеинформальдегидной смол, армированных волокнами различной химической природы: углеродными и полиоксадиазольными. Показано, что наличие фталидного цикла в структуре смолы позволяет повысить удельную ударную вязкость композитов. Наблюдается снижение износа и стабилизация коэффициента трения композитов на основе модифицированного фенолформальдегидного полимера, при этом формируется более твердый поверхностный слой как при прессовании, так и при трении. Методом оптической микроскопии показана структура поверхности после трения для исследованных композитов.

Ключевые слова: коэффициент трения, износ, фенолформальдегидная смола, углеродное волокно, полиоксадиазольное волокно.

Введение

Волокноармированные фенолформальдегидные (ФФ) композиты нашли широкое применение при разработке антифрикционных самосмазывающихся материалов [1]. Номенклатура выпускаемых ФФ полимеров довольно широка, однако, за последние годы проводилось мало исследований в области модификации ФФ связующих, особенно с целью повышения их антифрикционных свойств.

При введении в полимерную цепь фталидного фрагмента путем конденсации фенола, фенолфталеина и формальдегида в щелочной среде был получен фенолфталеинформальдегидный полимер с повышенной термостойкостью. Фенолфталеин и фенол находятся в соотношении 40:60 [2]. ФФ-40 имеют в повторяющемся звене элемент, который содержит боковую циклическую группировку (рис. 1). Соолигомер ФФ-40 обладает повышенной термостойкостью. Отверждение данного полимера происходит без интенсивного выделения летучих веществ. Благодаря чему ФФ-40 можно перерабатывать несложными технологиями формования.

STUDY OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED PHENOL-FORMALDEHYDE COMPOSITES

Panova M.O., Buyaev D.I., Shaposhnikova V.V., Solov'eva V.A., Lubimova A.S.

The tribological and physico-mechanical properties of composites based on resole phenol-formaldehyde and phenolphthalein-formaldehyde resins reinforced with fibers of various chemical nature: carbon and polyoxadiazole were studied. It is shown that the presence of a phthalide cycle in the resin structure makes it possible to increase the specific impact strength of composites. A decrease in wear and stabilization of the friction coefficient of composites based on a modified phenol-formaldehyde polymer is observed, while a harder surface layer is formed both during pressing and during friction. The optical microscopy method shows the surface structure after friction for the studied composites.

Keywords: coefficient of friction, wear, phenol-formaldehyde resin, carbon fiber, polyoxadiazole fiber.

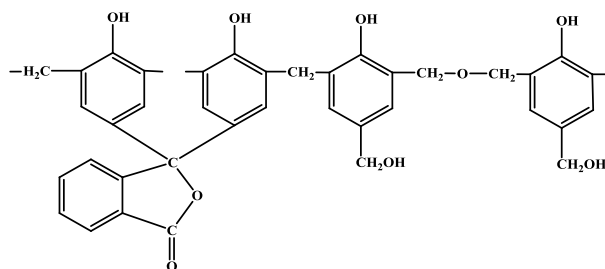


Рис.1. Структура фенолфталеинформальдегидной смолы

В работе [3] было отмечено, что органопласты на основе ФФ-40 обладают хорошими трибологическими характеристиками. Для более подробной оценки трибологических свойств этого связующего были выбраны два типа армирующих тканей, различных по своей природе. Одним из них являлось углеродное волокно, которое широко применяется для производства волокноармированных ФФ композитов, в том числе, антифрикционных [4]. Другой тип – синтетическое полимерное полиоксадиазольное волокно, обладающее высокой прочностью, твердостью, химической инертностью и стабильным низким коэффициентом трения [5].

Задачей исследования является изучение трибологических свойств композитов на основе фенолформальдегидной и фенолфталеинформальдегидной смол, армированных разными типами волокон в виде тканей.

Материалы и методы

Объектами исследования выступали ФФ композиты, на основе углеродных (УВ) и полиоксадиазольных (ПОД) волокон в виде тканей. Свойства применяемых армирующих тканей приведены в табл. 1.

В качестве связующих в исследуемых композитах применяли ФФ смолу резольного типа марки ЛБС-20 производства ФКП «Завод им. Я. М. Свердлова» и фенолфталеинформальдегидную смолу ФФ-40, синтезированную в ИНЭОС РАН (содержание фталидной группы 16,7 мол.%). Свойства связующих представлены в табл. 2.

Табл. 1. Свойства армирующих тканей

Наименование показателя	УВ	ПОД
Марка ткани	УВИС	Арселон
Тип переплетения нитей	саржа	саржа
Поверхностная плотность, г/м ²	290±40	470±60
Разрывная нагрузка, Н, не менее по основе	833	1250
по утку	245	1100

Табл. 2. Свойства ФФ связующих

Наименование показателя	ЛБС-20	ФФ-40
Массовая доля свободного фенола, %	8,3	6,1
Время желатинизации, с	90	118

Ткани пропитывали 50% спиртовым раствором ФФ смолы (содержание волокнистого наполнителя в композите 60 масс.%) и сушили сутки в вытяжном шкафу и далее в термошкафу 1 час при температуре 80 °С для удаления спирта и влаги. Образцы для испытаний получали прямым прессованием из препрегов при температуре 160°С.

Удельную ударную вязкость и разрушающее напряжение при изгибе определяли на приборе типа «Динстат». Коэффициент сухого трения (μ) определяли на машине трения торцевого типа И-47 при скорости 0,5 м/с, нагрузке 11,4 Н и продолжительности испытания 30 мин. Образцы для испытаний представляли собой диски $D = 22$ мм и $h = 2$ мм. С целью снижения фрикционного нагрева в узле трения применяли контртело с тремя стальными шариками $d = 5$ мм (рис. 2). Весовой износ образцов определяли на аналитических весах.

Микротвердость поверхности определяли на приборе ПМТ-3, индентор – алмазная пирамида с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями 136°, нагрузка 100 г.

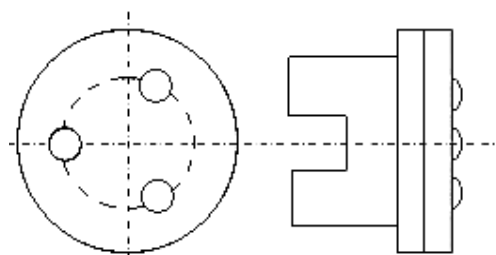


Рис. 2. Схема шарикового контртела

Микроструктуру образцов исследовали методом оптической микроскопии на лабораторном микроскопе «Биомед ММР-1». Для фотосъемки использовалась цифровая фотокамера DCM 500 с разрешением сенсора 5 МПикс. В дальнейшем цифровые фотографии обрабатывались программой «ScopePhoto 3.0.12.781».

Результаты и обсуждение

Физико-механические свойства ФФ композитов определяются как типом армирующего компонента, так и строением связующего. Наличие фталидного фрагмента в структуре ФФ смолы приводит к увеличению времени желатинизации смолы (табл. 2). При прессовании образцов при стандартных условиях, вероятно, в связующем остается недоотвержденная фракция, что позволяет значительно повысить показатели удельной ударной вязкости исследуемых композитов, причем независимо от природы армирующего компонента (табл. 3). Однако при этом наблюдается общая тенденция снижения изгибающего напряжения при разрушении в случае смолы ФФ-40 (табл. 3).

Табл. 3. Физико-механические свойства ФФ композитов

Состав композита	Удельная ударная вязкость, кДж/м ²	Изгибающее напряжение при разрушении, МПа
УВ + ЛБС-20	25,0	205,4
УВ + ФФ-40	31,1	192,5
ПОД + ЛБС-20	20,3	179,7
ПОД + ФФ-40	24,0	176,4

Как видно из графика (рис. 2 (а)) трение УВ композитов на основе ЛБС-20 имеет долгий период приработки и стабилизируется только к концу испытания, при этом амплитуда колебания коэффициента трения достаточно высока. В случае с ФФ-40 этот показатель значительно ниже, однако стабилизация коэффициента трения также происходит только в конце испытания.

Характер трения композитов, армированных ПОД тканью на основе ФФ-40, отличается минимальными показателями коэффициента трения, амплитуды колебания коэффициента трения и износа (рис. 2 (б), табл. 4).

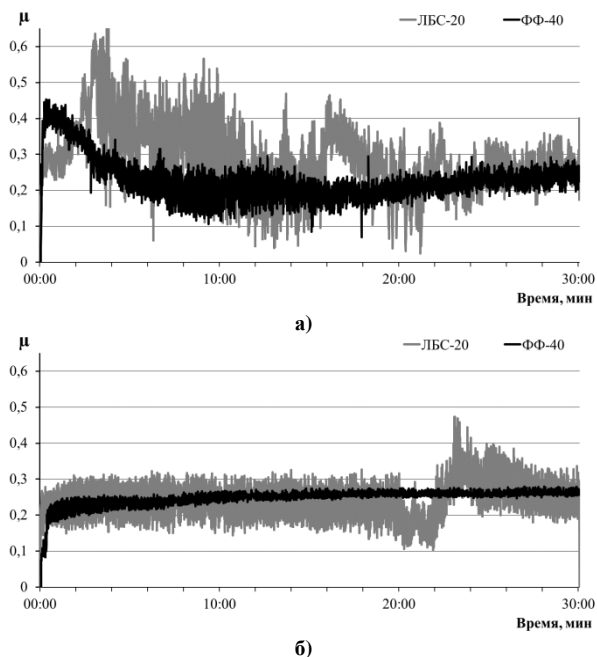


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (μ) от времени для ФФ композитов со связующими ЛБС-20 и ФФ-40, армированных тканями на основе УВ (а), ПОД волокон (б)

Табл. 4. Показатели износа и микротвердости поверхности исследуемых ФФ композитов

Состав композита	Износ, мг	Микротвердость поверхности, Н _М , кг/мм ²	
		до трения	после трения
УВ + ЛБС-20	1,4	48,8	53,8
УВ + ФФ-40	1,0	51,7	58,3
ПОД + ЛБС-20	1,4	26,8	27,2
ПОД + ФФ-40	0,4	30,6	33,5

При исследовании микротвердости поверхностей композитов было отмечено, что этот показатель в значительной степени зависит от прочности армирующего волокна, однако прослеживается общая тенденция увеличения микротвердости поверхности после трения (табл. 4). При этом, показатели микротвердости УВ и ПОД композитов на основе ФФ-40 выше, что, вероятно, обусловлено более высокой термостойкостью этой смолы, и при прессовании термоокислительные деструктивные процессы в поверхностном слое протекают менее активно, по сравнению с ЛБС-20.

Как видно из рис. 3 (а, в), у композитов, независимо от типа армирующих волокон, наблюдается комбинированная структура поверхности трения, состоящая как из фрагментов армирующих волокон, так и участков ФФ связующего ЛБС-20.

В случае связующего ФФ-40, поверхность трения зависит от типа армирующего волокнистого наполнителя. Так, у УВ композита на поверхности преобладает слой полимера, при этом ширина дорожки трения значительно меньше по сравнению

с ЛБС-20. ПОД композит также имеет более узкую дорожку трения, однако при этом на поверхности присутствуют и волокна и фрагменты деструкции связующего ФФ-40, обеспечивающие более низкий и стабильный коэффициент трения.

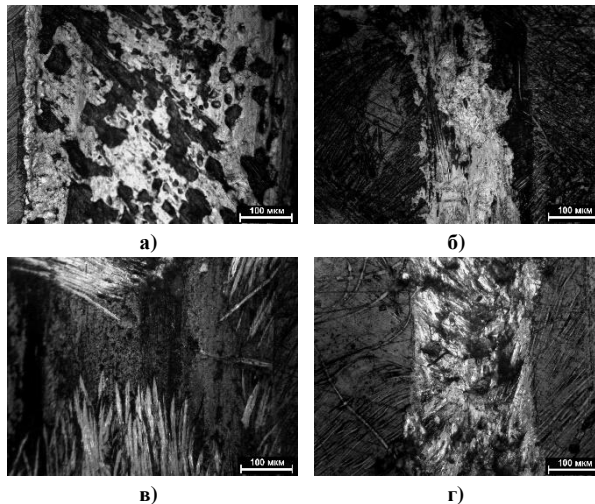


Рис. 3. Микрофотографии поверхности ФФ композитов после трения: а) УВ+ЛБС-20, б) УВ+ФФ-40, в) ПОД+ЛБС-20, г) ПОД+ФФ-40

Заключение

Таким образом, фенолфталеинформальдегидная смола ФФ-40 является перспективным связующим для создания износостойких антифрикционных материалов, армированных углеродными и полиоксадиазольными волокнами в виде тканей. Такие композиты обладают улучшенными трибологическими характеристиками, а также более высокими показателями удельной ударной вязкости.

Работа выполнена в рамках Государственного задания №075-00697-22-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

- [1] Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 96-114.
- [2] Коршак В.В., Сергеев В.А., Шитиков В.К., Северов А.А., Назмутдинова И.Х., Желтакова С.Г., Бурлуцкий В.Ф., Киселев Б.А., Яременко В.В. Фенолфталеинсодержащие термореактивные сополимеры // Журнал «Высокомолекулярные соединения». – 1968. – Т. X. – № 5. – С. 1085-1091.
- [3] Панова М.О., Краснов А.П., Горбунова И.Ю., Клабукова Л.Ф., Салазкин С.Н., Езерницкая М.Г. Исследование свойств трения органоластов на основе кардового фенолфталеинформальдегидного полимера // Пластические массы. – 2020. – №. 9-10. – С. 53-55.
- [4] Симамура С. Углеродные волокна. М.: Мир, 1987. – 304 с.
- [5] Sazanov Yu.N., Dobrovolskaya I.P., Lysenko V.A., Salnikova P.Yu., Kosyakov D.S., Pokryshkin S.A. Thermochemical structural transformations of polyoxadiazoles // Macromolecular Compounds and Polymeric Materials. 2015 // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2015. – Т. 88. – № 8. – С. 1304-1310.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТОЧЕЧНОГО УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА С УЧЁТОМ МАССЫ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ

Пановко М.Я.

E-mail: mpanovko@yandex.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Представлены результаты численного анализа характеристик упругогидродинамического контакта при качении со смазкой деформируемого шара с учётом его массы по упругому полупространству. Учёт массы шара при формулировке математической модели контакта позволило расширить класс получаемых решений и исследовать колебательные процессы в зоне контакта. Показано значительное влияние гармонической вынуждающей силы, приложенной к шару, на распределения в зоне контакта давления, толщины смазочной плёнки, октаэдрических напряжений в подповерхностном слое.

Ключевые слова: упругогидродинамический контакт, масса шара, возбуждающая сила, октаэдрические напряжения, численное моделирование.

Введение

Задачи об упругогидродинамической (УГД) смазке сосредоточенных контактов (подобные контакты имеют место в шарикоподшипниках и зубчатых передачах) в подавляющем числе случаев формулируются в предположении о равенстве интеграла по площади контакта от распределения давления в смазочном слое внешней нагрузке (уравнение статики). При этом контактирующие тела рассматриваются как безмассовые и соответственно исключаются из анализа силы инерции. В работах [1-3] показано, что учёт сил инерции (второго закона Ньютона) при формулировке математической модели УГД контакта позволяет расширить класс получаемых решений и исследовать колебательные процессы в зоне контакта. Настоящая работа посвящена изучению колебательных процессов в зоне точечного УГД контакта при качении деформируемого шара заданной массы, на который действует возбуждающая сила, по упругому полупространству со смазкой. С этой целью на основе методики [4] проведено численное моделирование УГД контакта с учётом массы контактирующих тел. В результате получены

NUMERICAL ANALYSIS OF POINT ELASTOHYDRODYNAMIC CONTACT TAKING INTO ACCOUNT THE MASS OF THE CONTACTING BODIES

Panovko M.Ya.

The results of numerical analysis of the characteristics of elastohydrodynamic contact during rolling with lubrication of a deformable ball, taking into account its mass in an elastic half-space, are presented. Taking into account the mass of the ball in the formulation of the mathematical model of contact made it possible to expand the class of solutions obtained and to investigate oscillatory processes in the contact zone. A significant influence of the harmonic exciting force applied to the ball on the distributions in the contact zone of pressure, the thickness of the lubricating film, and octahedral stresses in the subsurface layer is shown.

Keywords: elastohydrodynamic contact, ball mass, exciting force, octahedral stresses, numerical simulation.

решения, отражающие колебательный характер поведения параметров УГД контакта. Показано значительное влияние на его параметры возбуждающей силы и массы шара, в частности, на давление и толщину смазочной плёнки в зоне контакта, на октаэдрические напряжения в подповерхностном слое.

Постановка задачи

Схема контактирующих тел представлена на рис. 1 [4]. В области контакта вводится подвижная система координат, ось z которой проходит через центр шара массой m_b , а плоскость xy совпадает с границей упругого полупространства $z=0$.

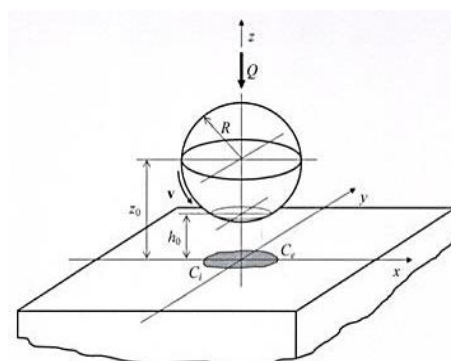


Рис. 1. Схема контакта

Полупространство описывается координатами: $|x| < \infty$, $|y| < \infty$, $z \leq 0$. Предполагается, что контактирующие поверхности являются гладкими. Поверхность шара движется с линейной скоростью $\mathbf{v}(v_x, 0)$; смазочный материал в зазоре между поверхностями, обладает свойствами несжимаемой вязкой ньютоновской жидкости и находится в изотермических условиях; к шару приложена изменяющаяся во времени внешняя сила Q , вызывающая его упругую деформацию в зоне смазанного точечного контакта.

Физические свойства шара и зависимость вязкости смазочной плёнки от давления полагаются известными. В математической модели УГД контакта использовались следующие безразмерные переменные:

$$\begin{aligned} (x', y', \xi', \eta') &= (x, y, \xi, \eta) / a_H, t' = t / t_0, p' = p / p_H, \\ \sigma'_{ij} &= \sigma_{ij} / p_H, z' = z / a_H, t_0 = 2a_H / |\mathbf{v}|, \mathbf{v}' = \mathbf{v} / |\mathbf{v}|, \\ V &= 24\mu_0 |\mathbf{v}| R^2 / p_H a_H^3, h' = h / h_0(t), \mu' = \mu / \mu_0, \\ H_0(t) &= 2Rh_0(t) / a_H^2, \delta'(t) = 2R\delta(t) / a_H^2, \omega' = 2a_H \omega / |\mathbf{v}|, \\ Q_0' &= Q_0 / p_H, W = \pi m_b v^2 / 12 P_0 R, \\ d(0) &= 4RD(0) / (a_H v) = d_0^0, f(t) = Q(t) / P_0. \end{aligned}$$

Здесь x, y, ξ, η – декартовы координаты; t – время; $p(x, y, t)$ – давление; $h(x, y, t)$ – толщина смазочной плёнки; $h_0(t)$ – толщина смазочной плёнки в центре контакта; a_H – полуось герцевского контакта для сферических тел; p_H – максимальное герцевское давление; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений в подповерхностном слое; t_0 – характерное время процесса; ω – частота; μ – вязкость смазочной плёнки; μ_0 – вязкость смазочной плёнки при давлении окружающей среды; H_0 – безразмерная толщина смазочной плёнки в начале координат; V – нагрузочно-скоростной параметр; Q_0 – пьезокоэффициент вязкости смазочной плёнки; δ – смещение центра шара в направлении оси z ; $Q(t)$ – внешняя нагрузка (возбуждающая сила); $P_0 = 2\pi p_H (a_H)^2 / 3$ – внешняя нагрузка в стационарной задаче; $D(0)$ – значение скорости центра шара в направлении оси z в начальный момент времени $t=0$; безразмерная скорость d_0^0 – задаваемая величина. Функция $f(t) = 1 + A \sin \omega t$, A – амплитуда возбуждающей силы, в стационарном случае $f(t) = 1$.

Математическая модель УГД контакта для определения распределений давления и толщины смазочной плёнки в зоне контакта описывается нелинейной интегродифференциальной системой нестационарных уравнений с учетом движения деформируемого шара в вертикальном направлении с начальными и граничными условиями. Для

определения местоположения выходной границы C_e в задаче используются условия дополненности ($p > 0$ в зоне смазки, $p = 0$ в зоне кавитации) [5]. Распределения $p(x, y, t)$ использовались для расчёта компонент тензора напряжений $\sigma_{ij}(x, y, z, t)$ из соотношения:

$$\sigma_{ij}(x, y, z, t) = \iint_{(S)} G_{ij}(x-\xi, y-\eta, z) p(\xi, \eta, t) d\xi d\eta.$$

Здесь $G_{ij}(x-\xi, y-\eta, z)$ – тензор Грина задачи Буссинеска [6]. Октаэдрическими нормальные $\sigma^{\text{oct}}(x, y, x, t)$ и касательные $\tau^{\text{oct}}(x, y, x, t)$ напряжения вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma^{\text{oct}} &= (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) / 3, \\ \tau^{\text{oct}} &= [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + \\ &+ (\sigma_{11} - \sigma_{33}) + (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2) / 6]^2 / 3. \end{aligned}$$

Численный метод

Решение задачи осуществлялось на основе метода Ньютона с применением неявной схемы при аппроксимации нестационарных уравнений. Линеаризованные уравнения около решения $(p(x, y, t_{n+1}), H_0(t_{n+1}))_k^{n+1}$, где n – номер временного шага, k – номер итерации на текущем временном шаге, используются для построения конечноразностной схемы. В расчётной области, задаваемой в виде прямоугольника в плоскости (x, y) , вводилась декартова сетка. Метод контрольного объема применялся для дискретизации уравнений. На каждом шаге итерационного процесса решались разностные уравнения относительно приращений $\Delta H_{0,k+1}|^{n+1}, \Delta p_{k+1}|^{n+1}$ методом гауссова исключения с частичным выбором ведущего элемента, вычислялись $H_{0,k+1}|^{n+1} = H_{0,k}|^{n+1} + \Delta H_{0,k+1}|^{n+1}, p_{k+1}|^{n+1} = p_k|^{n+1} + \Delta p_{k+1}|^{n+1}, h_{k+1}|^{n+1}, \delta_{k+1}|^{n+1}$, определялась выходная граница $x_{e,k+1}|^{n+1}$. Итерационный процесс на текущем временном шаге продолжался до достижения требуемой относительной точности решения. По завершении итераций выполнялся переход на следующий шаг по времени. Проверка условий дополненности осуществлялась в каждом узле расчётной сетки после решения системы конечноразностных уравнений. Сингулярные интегралы в математической модели вычислялись по кубатурной формуле (см. [7]). Область для расчёта подповерхностных напряжений $\sigma_{ij}(x, y, z, t), \sigma^{\text{oct}}(x, y, x, t), \tau^{\text{oct}}(x, y, x, t)$ в полупространстве $|x| < \infty, |y| < \infty, z \leq 0$ задавалась в виде параллелепипеда.

Результаты расчётов

Вычислительный алгоритм применялся для анализа реакции УГД контакта как на возмущение начальных условий, так и возмущение внешней

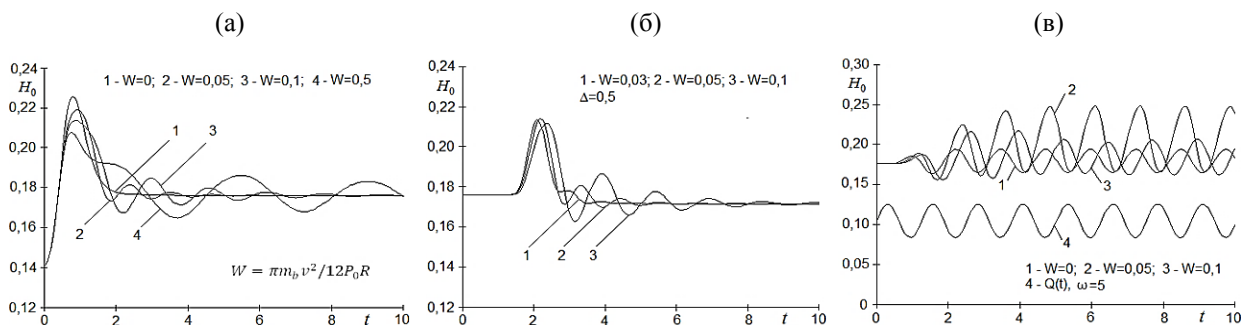


Рис. 2. Зависимость толщины смазочной плёнки $H_0(t)$ от возмущения начального условия (а), ступенчатого нагружения внешней нагрузки (б), гармонической возбуждающей силы (в)

нагрузки. Численное моделирование осуществлялось на сетке 40×40 при $V=0,1$ и $Q_0=5$, соответствующих условиям тяжёлого нагружения точечного УГД контакта. Вектор скорости качения имел компоненты $v_x=1$, $v_y=0$. Шаг по времени задавался постоянным и равным $\Delta t=0,05$. Решение стационарной задачи было получено на основе стационарного варианта численного метода. Влияние возмущения начальных условий на поведение во времени $H_0(t)$ показано на рис. 2а для ряда значений параметра W . Из графиков следует, что при $W > 0$ (кривые 2, 3 и 4), в отличие от случая $W=0$ (кривая 1), возмущение начальных условий вызывает затухающие колебания $H_0(t)$ около стационарного значения. Времени затухания колебаний растёт с увеличением W . Ступенчатое увеличение нагрузки в заданный момент t вызывает затухающие колебания $H_0(t)$ около стационарного значения. Время затухания колебательного процесса увеличивается с ростом W (Рис. 2б). При изменении внешней нагрузки по синусоидальному закону с амплитудой $A=0,2 H_0(t)$ по завершении переходного режима имеет вид установившихся периодических колебаний (Рис. 2в). Амплитуда колебаний $H_0(t)$ снижается с ростом параметра W (см. зависимости 2 и 3 на Рис. 2в). Установившиеся колебания по завершении переходного режима наблюдались также в расчётах для разных значений частоты ω при неизменных прочих условиях (Рис. 3). При этом результаты свидетельствуют о немонотонной зависимости амплитуды колебаний от частоты ω . На Рис. 4 представлены распределения $p(x,y,t)$ и $h(x,y,t)$ в УГД контакте в условиях установившихся колебаний при $W=0,05$ и $\omega=5$ для временного интервала $5,0 \leq t \leq 6,25$, равного периоду колебаний, а также распределения $p(x,y,0)$ и $h(x,y,0)$, использованные в качестве начальных условий при численном моделировании. В представленных распределениях проявляются волновые свойства. В частности, распределения $h(x,y,t)$ подобны бегущей волне в направлении скорости качения.

На Рис. 5-8 представлены результаты расчёта октаэдрических напряжений σ^{oct} , τ^{oct} в подповерхностном слое в условиях установившихся колебаний при $W=0,05$, $A=0,2$, $\omega=5$. Распределения σ^{oct} на Рис. 5, 6, а также распределения τ^{oct} на Рис. 7, 8 представлены в виде изолиний в плоскости сечения $y=0$ в моменты времени $t=5,5$ и $t=6,0$, когда $Q(5,5)=Q_{max}$, $Q(6,0)=Q_{min}$.

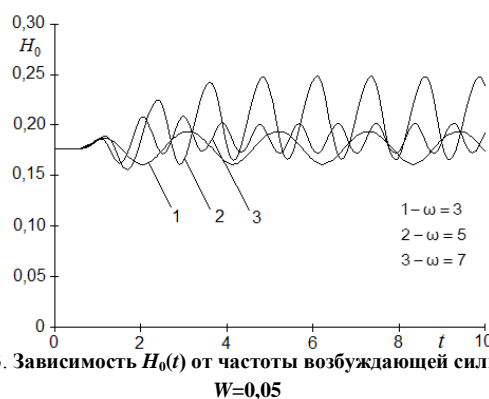


Рис. 3. Зависимость $H_0(t)$ от частоты возбуждающей силы при $W=0,05$

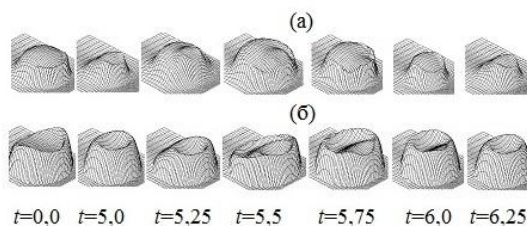


Рис. 4. Распределения $p(x,y,t)$ – (а) и $h(x,y,t)$ – (б) в зоне контакта в отдельные моменты времени на периоде установившихся колебаний ($t=5,0, \dots, 6,25$)

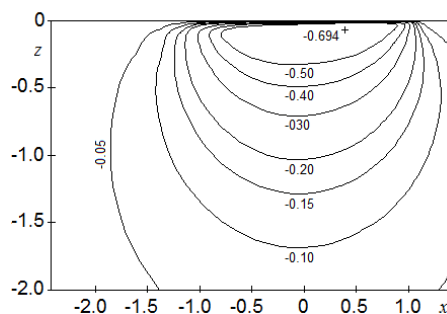


Рис. 5. Распределения $\sigma^{oct}(x,0,z; t=5,5)$

В подповерхностном слое σ^{oct} имеет отрицательный экстремум. Как показано на Рис. 5, в момент $t=5,5$ при Q_{max} наблюдается смещение экстремума $|\max(\sigma^{\text{oct}})|=0,694$ в направлении выхода из зоны контакта ($x_{\text{extr}}=0,417, z_{\text{extr}}=-0,052$), а в момент $t=6,0$ при Q_{min} – смещение экстремума $|\max(\sigma^{\text{oct}})|=0,516$ в противоположном направлении ($x_{\text{extr}}=-0,109, z_{\text{extr}}=-0,069$) (см. Рис. 6). В начальный момент $t=0$, когда $f(0)=Q(0)/P_0=1$, $|\max(\sigma^{\text{oct}})|=0,601$ ($x_{\text{extr}}=0,094, z_{\text{extr}}=-0,069$). Приведённые значения $|\max(\sigma^{\text{oct}})|$ показывают, что гармоническая возмущающая сила вызывает установившейся колебательный режим $|\max(\sigma^{\text{oct}})|$, когда колебания $|\max(\sigma^{\text{oct}})|$ совершаются около среднего значения $|\max(\sigma^{\text{oct}})|$, практически равного значению $|\max(\sigma^{\text{oct}})|$ при $t=0$.

Изолинии функции τ^{oct} представляют собой более сложную картину в сравнении с σ^{oct} . Как видно на рис. 7 и Рис. 8, в подповерхностном слое имеются локальные экстремумы τ^{oct} , расположенные как вблизи поверхности контакта, так и вдали от неё. Значения экстремумов вдали от поверхности контакта значительно выше тех, что вблизи неё. Как показано на Рис. 7, в момент $t=5,5$ при Q_{max} наблюдается смещение экстремума $\max(\tau^{\text{oct}})=0,426$ в направлении входа в зону контакта ($x_{\text{extr}}=-0,223, z_{\text{extr}}=-0,458$), в момент $t=6,0$ при Q_{min} экстремум $\max(\tau^{\text{oct}})=0,342$ также смещён в направлении входа ($x_{\text{extr}}=-0,109, z_{\text{extr}}=-0,28$) (см. Рис. 8). В начальный момент $t=0$, когда $f(t)=Q(t)/P_0=1$, $\max(\tau^{\text{oct}})=0,377$ ($x_{\text{extr}}=-0,003, z_{\text{extr}}=-0,358$). Приведённые значения $\max(\tau^{\text{oct}})$ показывают, что гармоническая возмущающая сила вызывает установившейся колебательный режим $\max(\tau^{\text{oct}})$, когда колебания $\max(\tau^{\text{oct}})$ совершаются около среднего значения $\max(\tau^{\text{oct}})$, практически равного значению $\max(\tau^{\text{oct}})$ при $t=0$. При $W=0$, амплитуды колебаний локальных экстремумов σ^{oct} и τ^{oct} значительно ниже, чем в случае при $W=0,05$

Заключение

Результаты расчётов показали, что при возмущении начальных условий, а также внешней нагрузки (ступенчатой) толщина смазочной плёнки в центре контакта стремится в форме затухающих колебаний к стационарному значению, причём время колебательных процессов растёт с увеличением массы шара. Под действием синусоидальной возбуждающей силы возникают установившиеся колебания толщины смазочной пленки в центре контакта, амплитуда которых уменьшается с увеличением массы шара. Распределение толщины смазочной плёнки между

контактирующими телами при этом приобретает волновые свойства типа бегущей волны. Синусоидальная возмущающая сила вызывает установившиеся колебания локальных экстремумов октаэдрических напряжений, амплитудные значения которых выше, чем в случае безмассовых тел.

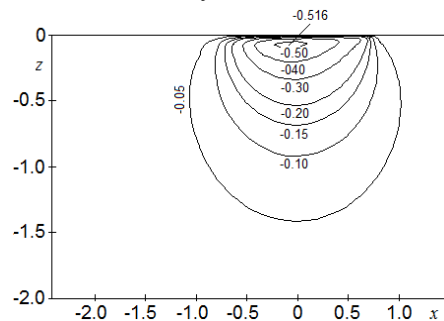


Рис. 6. Распределения $\sigma^{\text{oct}}(x, 0, z; t=6,0)$

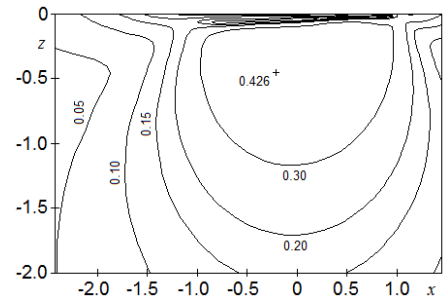


Рис. 7. Распределения $\tau^{\text{oct}}(x, 0, z; t=5,5)$

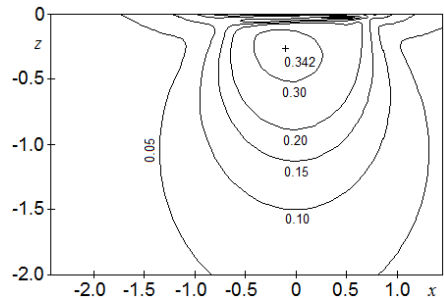


Рис. 8. Распределения $\tau^{\text{oct}}(x, 0, z; t=6,0)$

- [1] Кудиш И.И., Пановко М.Я. Колебания деформируемого цилиндра при его качении по жёсткому полупространству со смазкой // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – № 5. – С. 755-776.
- [2] Wijnant Y.H., Venner C.H. Analysis of an EHL circular contact incorporating rolling element vibration // Elastohydrodynamics '96, Fundamentals and Application in Lubrication and Traction. Amsterdam: Elsevier, 1997. – С. 445-456.
- [3] Kudish I. I. On Formulation of a Non-Steady Lubrication Problem for a Non-Conformal Contact© //Tribology transactions. – 1999. – Т. 42. – № 1. – С. 53-57.
- [4] Пановко М.Я. Колебания деформируемого шара при его качении по жесткому полупространству со смазкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 3. – С. 79-90.
- [5] Oh K.P. The numerical solution of dynamically loaded elastohydrodynamic contact as a nonlinear complementarity problem // Trans. ASME. J. Tribol. – 1984. – Т. 106. – № 1. – С. 88-95.
- [6] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир. 1989. – 510 с.
- [7] Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М.: Наука, 1985. – 253 с.

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АЛМАЗ – КАРБИД КРЕМНИЯ

Перевислов С.Н.

E-mail: perevislov@mail.ru

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия.

Получен композиционный материал алмаз-карбид кремния. Исследован реакционно-диффузионный механизм спекания Тьюринга. Изучены механические свойства композита алмаз-карбид кремния.

Ключевые слова: алмаз, карбид кремния, реакционное спекание, композиты алмаз-карбид кремния, реакционно-диффузионный механизм Тьюринга, графитизация алмаза, механические характеристики.

Введение

Развитие современных технологий требует применения новых керамических материалов, обладающих максимальными механическими и эксплуатационными характеристиками. Композиционные материалы на основе алмазных частиц представляют большой интерес для промышленности, благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая твердость и теплопроводность, повышенная износостойкость, что позволяет увеличить срок службы изделий в условиях экстремальных нагрузок [1]. Одним из перспективных методов получения композиционных материалов на основе алмазных частиц является реакционное спекание (пропитка расплавом кремния) [2–4]. В этом случае формируемый прочный каркас из алмазных частиц заполняется карбидом кремния, по аналогии с реакционно-спеченным (силицированным) карбидом кремния [5, 6]. Алмаз хорошо смачивается жидким кремнием, что обеспечивает хорошую пропитку алмазного каркаса и получение беспористого материала.

Целью данной работы является получение композиционных материалов алмаз – карбид кремния и изучение их физико-механических характеристик.

Материалы и методы

В качестве исходных компонентов использовали следующие материалы: Si (марки КР00, Россия), смесь алмазных порошков размерами 20–28 мкм (Ds) и 225–250 мкм (Db), технический углерод марки К-354. Кремний дробили в установке КИД-60 до размера $d_{0,5} = 1–2$ мм.

PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS DIAMOND – SILICON CARBIDE

Perevislov S.N.

Composite material diamond-silicon carbide was obtained. The reaction-diffusion mechanism of Turing sintering has been studied. The mechanical properties of the diamond-silicon carbide composite were studied.

Keywords: diamond, silicon carbide, reaction sintering, diamond-silicon carbide composites, Turing reaction-diffusion mechanism, diamond graphitization, mechanical characteristics.

Для получения материалов выбраны следующие составы: 30 об. % Ds + 70 об. % Db (составы 1 и 3) и 25 об. % Ds + 70 об. % Db + 5 об. % технического углерода (состав 2). Исходные порошки Ds и Db в сухом виде перемешивали в барабанном смесителе в течение 5 ч, с мелющими телами из спеченного SiC. Смеси пластифицировали 35 % спиртовым раствором фенолформальдегидной смолы и гранулировали. Пластифицированные порошки сушили на воздухе при температуре 80 °С, из них прессовали образцы размером 5×5×50 мм при давлении 100 МПа (составы 1 и 2) и 50 МПа (состав 3). Образцы сушили при температуре 110 °С в течение 5 ч. Пиролиз фенолформальдегидной смолы проводили в вакуумной печи сопротивления при температуре 800 °С в течение 5 ч. Спекание проводили при температуре 1600 °С в вакууме, в течение 1 ч. Затем спеченные образцы поступали на пескоструйную обработку.

Плотность (ρ) образцов определяли методом гидростатического взвешивания. Рентгенофазовый анализ материалов проводили на дифрактометре Rigaku Smartlab 3 с CuK α -излучением и Ni-фильтром. Микроструктуру исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH. Предел прочности при трехточечном изгибе ($\sigma_{изг}$) определяли на разрывной машине ShimadzuAG-300kNX. Модуль упругости (E) и скорость распространения звука в материале (v) определяли резонансным методом на установке ЗВУК-130. Твердость по Виккерсу (HV) определяли методом индентирования на микротвердомере ТП-7р-1 при нагрузке до 98,1 Н, критический коэффициент интенсивности напряжений (K_{IC})

высчитывали исходя из измерений длины трещин (a), исходящих из угла отпечатка пирамиды Виккерса при нагрузке (P).

Реакционно-диффузионный механизм синтеза композитов алмаз-карбид кремния

Согласно [7–9] при пропитке жидким кремнием пористых заготовок из алмазных частиц композит алмаз-карбид кремния формируется согласно реакционно-диффузионному механизму Тьюринга (A. Turing) [10]. На первом этапе пропитки образуется тонкий слой SiC путем контакта жидкого Si со слоем углерода на поверхности алмазных частиц. Дальнейшая реакция взаимодействия кремния с углеродом осуществляется путем диффузии Si через слой SiC. Следовательно, процесс реакции включает диффузию атомов кремния через слой карбида кремния и реакцию между Si и углеродом.

Соответственно, исходя из реакционно-диффузионного механизма Тьюринга на поверхности алмазных частиц формируются наноразмерные зерна SiC при диффузии газообразного Si в пористую заготовку. При пропитке расплавом жидкого кремния и растворении частиц пироуглерода и частично алмаза, формируются микронные зёрна SiC, образуя в обоих случаях «забор» Тьюринга (рис. 1).

Наслаивание на алмазные частицы карбида кремния (формирование «забора» Тьюринга) приводит к обволакиванию всех алмазных частиц плотными слоями синтезируемого карбида кремния до заполнения всего порового пространства между алмазами, образующими каркас образца и получения монолитного композиционного материала алмаз-карбид кремния (рис. 2).

Анализ микроструктуры

На рис. 3 изображена микроструктура композита алмаз-карбид кремния. Темные фазы соответствуют частицам алмаза, серые – β -SiC. Кристаллы алмаза правильной формы, однородно распределены в композите, соответственно кристаллы алмаза не растворяются в Si в процессе пропитки (реакционного спекания). Пор в материале практически нет, что говорит о прочной межфазной связи между алмазом и SiC (рис. 3). Поскольку алмаз и карбид кремния являются гетерогенетичными материалами при пропитке жидким кремнием осуществляется реакционно-диффузионный механизм Тьюринга, что позволяет синтезировать карбида кремния без четкой переходной границы между частицами алмаза и SiC.

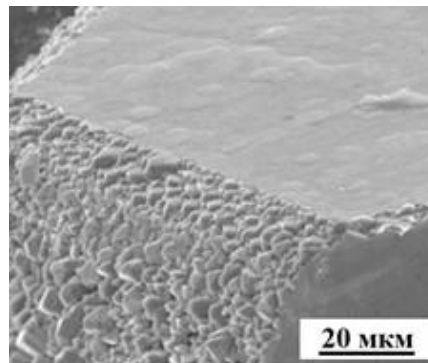


Рис. 1. Формирование микронных зёрен SiC («забор» Тьюринга) на поверхности алмазной частицы

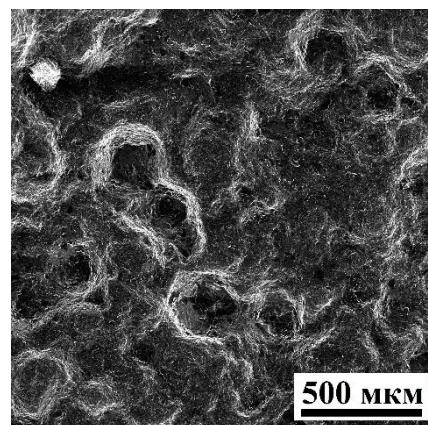


Рис. 2. Формирование слоев SiC («забора» Тьюринга) в композите алмаз – SiC

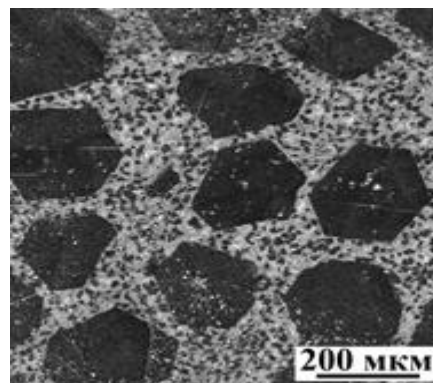


Рис. 3. Микроструктура композита алмаз-карбид кремния

Анализ физико-механических свойств

Значительный уровень механических характеристик может быть достигнут на материалах, характеризующихся высокой плотностью и низкой пористостью. Для композита алмаз-карбид кремния определяющим фактором, влияющим на значение плотности, является форма исходных частиц алмаза, точность выбранного дисперсного состава алмазных порошков (двух-, трехфракционный состав порошков), оптимальное давление формования заготовок, что приводит к получению материалов, обладающей максимальной плотностью и наивысшим уровнем механических характеристик

(табл. 1). При давлении формования 50 МПа (материал состава 3) заготовки характеризуются повышенной пористостью, а реакционно-спеченные (пропитанные) материалы – высоким содержанием остаточного кремния, наличие которого в составе композита уменьшает его механические характеристики (таблица). Также остаточный кремний снижает высокотемпературную прочность композита алмаз-карбид кремния. В состав 2 дополнительно добавляли 5 об. % технического углерода, что при пропитке Si привело к формированию большего количества карбида кремния и снижению твердости (таблица 1).

Табл. 1. Механические свойства реакционно-спеченных материалов на основе алмаза, SiC и B₄C

Материал	ρ , г/см ³	E, ГПа	ν , км/с	$\sigma_{изг}$, МПа	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}	HV, ГПа
Алмаз-SiC, состав 1	3,38	760	15,0	420	4,7	68
Алмаз-SiC, состав 2	3,36	720	14,8	425	4,8	62
Алмаз-SiC, состав 3	3,34	670	14,5	405	4,5	56
Реакционно-спеченный SiC [11]	3,05-3,1	380-410	10,2	380-400	3,5-4,0	20-21
Реакционно-спеченный B ₄ C [12]	2,6-2,65	380-420	11,8	350-380	3,2-3,5	28-30

Полученный материал – композит алмаз-карбид кремния по уровню механических характеристик превосходит классические материалы – реакционно-спеченный карбид кремния [11] и реакционно-спеченный карбид бора [12].

Заключение

Высокие свойства материала состава 1 говорят о реализации в нем условий прохождения реакционно-диффузионного механизма Тьюринга, получен материал с регулярной (периодической) микроструктурой, что значительно повышает физико-механические свойства композита алмаз-карбид кремния: E = 760 ГПа; ν = 15,0 км/с; $\sigma_{изг}$ = 420 МПа; K_{1C} = 4,7 МПа·м^{1/2}; HV = 68 ГПа (для материала состава 1). Композит алмаз-карбид кремния по уровню механических характеристик превосходит классические материалы – реакционно-спеченный карбид кремния и реакционно-спеченный карбид бора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 21-73-30019).

- [1] Riedel R. Handbook of ceramic hard materials // Wiley-VCH. – 2000. – 1020 с.
- [2] Matthey B. et al. SiC-bonded diamond materials produced by pressureless silicon infiltration //Journal of Materials Research. – 2017. – Т. 32. – №. 17. – С. 3362-3371.
- [3] Li J. et al. Microstructure and properties of C/SiC- diamond composites prepared by the combination of CVI and RMI //Advanced Engineering Materials. – 2019. – Т. 21. – №. 5. – С. 1800765.
- [4] Taylor A. et al. Synthesis and properties of diamond-silicon carbide composite layers //Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Т. 800. – С. 327-333.
- [5] Knippenberg W.F. Growth phenomena in silicon carbide // Philips Res. Report. – 1963. – Т. 18. – С. 161-274.
- [6] Perevislov S.N. et al. Effect of SiC Fiber Content in Silicon Carbide Material on Its Mechanical Properties //Glass Physics and Chemistry. – 2022. – Т. 48. – №. 1. – С. 54-60.
- [7] Shevchenko V.Y. et al. New chemical technologies based on Turing reaction–diffusion processes //Doklady Chemistry. – Pleiades Publishing, 2021. – Т. 496. – №. 2. – С. 28-31.
- [8] Shevchenko V.Y., Perevislov S.N., Ugolkov V.L. Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond)–silicon system //Glass Physics and Chemistry. – 2021. – Т. 47. – №. 3. – С. 197-208.
- [9] Shevchenko V.Y., Perevislov S.N. Reaction–diffusion mechanism of synthesis in the diamond–silicon carbide system //Russian Journal of Inorganic Chemistry. – 2021. – Т. 66. – №. 8. – С. 1107-1114.
- [10] Turing A. The chemical basis of morphogenesis // Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B. – 1952. – Т. 237, № 641. – С. 37-72.
- [11] Nesmelov D. D. et al. Precipitation of the eutectic Al₂O₃–ZrO₂ (Y₂O₃) on the surface of SiC particles //Glass and Ceramics. – 2017. – Т. 74. – №. 1. – С. 43-47.
- [12] Perevislov S. N., Shcherbak V., Tomkovich M. V. Phase composition and microstructure of reaction-bonded boron-carbide materials //Refractories and Industrial Ceramics. – 2018. – Т. 59. – №. 2. – С. 179-183.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВ ВОДОСМЕШИВАЕМЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Пилюгин С.М.* , Шолом А.В., Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г.

*E-mail: pilyugin@rosoil.ru

Технопарк «ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», г. Уфа, Россия.

Выявлены экспериментальные зависимости нагрузки сваривания от температуры смазочно-охлаждающей жидкости. Предложен способ оценки комплексной эффективности смазочно-охлаждающей жидкости в лабораторных условиях, учитывающий охлаждающие и триботехнические свойства СОЖ.

Ключевые слова: нагрузка сваривания, смазочно-охлаждающая жидкость, охлаждающие характеристики.

Введение

Смазывающее действие смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) состоит в уменьшении схватывания, трения, изнашивания, задира и фрикционного нагрева контактирующих поверхностей инструмента и заготовки.

В зависимости от свойств обрабатываемого и инструментального материалов СОЖ могут увеличивать или уменьшать схватывание между ними и силы, затрачиваемые на обработку.

Охлаждающие свойства СОЖ оказывают влияние на снижение температуры инструмента и обрабатываемого материала. Снижение температуры в зоне обработки повышает точность получаемых размеров заготовки за счет уменьшения температурных деформаций, увеличивает стойкость инструмента, оказывает влияние на остаточные напряжения в поверхностном слое.

В настоящее время отсутствуют данные по зависимости между охлаждающими и триботехническими характеристиками водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей [1,2].

Данная проблема усугубляется еще тем, что при разработке и выборе наиболее эффективной СОЖ по триботехническим характеристикам при испытаниях по ГОСТ 9490 на четырехшариковой машине трения не наблюдается принципиальной разницы в определяемых показателях между водорастворимыми смазочно-охлаждающими

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF COOLING CHARACTERISTICS ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF LUBRICANT-COOLING LIQUIDS

Pilyugin S.M., Sholom A.V., Abramov A.N., Tyulenev D.G.

The experimental dependences of the welding load on the rotation speed of the upper ball are revealed when tested on a four-ball friction machine. A method is proposed for assessing the complex efficiency of a cutting fluid under laboratory conditions, taking into account the cooling and tribotechnical properties of the cutting fluid.

Keywords: welding load, cutting fluid, maximum cooling rate.

жидкостями, особенно по показателю – нагрузка сваривания.

Цель исследования

Целью исследований заключается в установление связи между охлаждающими и триботехническими характеристиками водорастворимых СОЖ, применяемых в процессах металлообработки.

Материалы и методы исследований

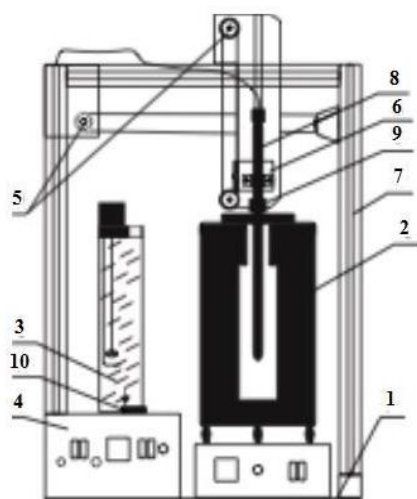
Для определения охлаждающих характеристик технологических жидкостей сотрудниками Технопарка ХТЦ УАИ - РОСОЙЛ была создана установка (УЗС-2). Основные технические характеристики установки соответствуют требованиям международных стандартов ISO 9950 (1999 г.), ASTM D6200 - 01(2017 г.) и ASTM D6482 - 06 (2016 г.) [3-6]. На рисунке 1,а показан общий вид установки и схема установки 1,б.

Цилиндрический образец – термодатчик (8) из никелевого сплава, имеющий термопару в своем геометрическом центре, нагревается в печи (2) до определенной температуры и затем переносится в фиксированный объем испытуемой жидкости.

Нагрев термодатчика осуществляется в трубчатой электропечи (2). Перенос термодатчика из печи в термостатированный (3) или другой сосуд с пробой исследуемой технологической среды производится автоматически с помощью механизма переноса.



а



б

Рис. 1. Внешний вид установки (а) для определения охлаждающих характеристик технологических и закалочных жидкостей и схема установки с механизмом переноса термодатчика (б)

- 1 – основание; 2 – печь; 3 – ёмкость с подогревом и перемешивающим устройством; 4 – блок управления; 5 – шаговые двигатели; 6 – держатель термодатчика; 7 – П-образная вертикальная стойка; 8 – термодатчик; 9 – втулка-заглушка; 10 – направляющие

Исследование с помощью данной установки охлаждающего действия различных СОЖ позволяет осуществить выбор СОЖ с наибольшей охлаждающей способностью.

Триботехнические свойства исследуемых СОЖ производили на четырехшариковой машине трения (ЧМТ-1) по ГОСТ 9490. Силу трения определяют с помощью датчика силы, специально установленном на четырехшариковой машине трения (см. рис. 2,

позиция 2). Датчик силы фиг. поз. (2) позволяет в любой момент времени фиксировать момента трения, возникающего при трении верхнего шарика о нижние. Вся информация о значениях момента трения после обработки специальным процессором поступает в ПЭВМ и выдается в виде графика «момент трения – время».

По величине момента трения определяли силу трения по формуле:

$$T = \frac{M_{тр}}{L}, \quad (1)$$

где $M_{тр}$ – момент трения, $N_{мм}$; где T – сила трения, H ; L – расстояние от оси вращения верхнего шарика до места крепления датчика силы, m .

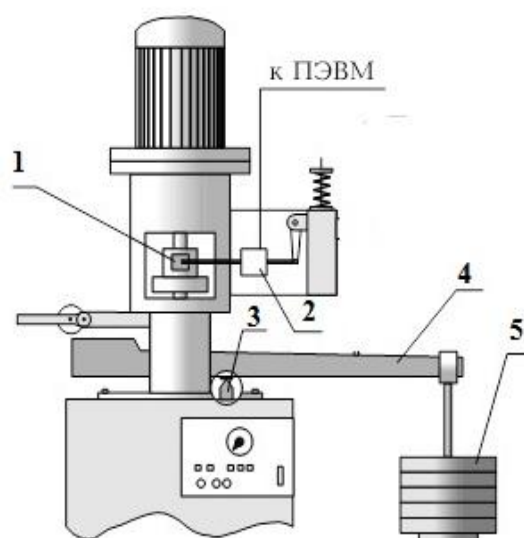


Рис. 2. Схема четырехшариковой машины трения:

- 1 – узел трения; 2 – датчик силы; 3 – призма; 4 – рычаг; 5 – грузы

Результаты и их обсуждение

В экспериментах были использованы СОЖ «Росойл-921» (на синтетической основе) и «Росойл-520» (на минеральной основе), которые применяются для различных операций металлообработки.

В таблице 1 показаны охлаждающие характеристики исследованных композиций СОЖ, полученные на установке по определению охлаждающих характеристик жидкостей согласно требованиям ASTM D6482 – 06.

Табл. 1. Охлаждающие характеристики исследованных композиций СОЖ

Тестируемая жидкость	Время охлаждения до 600 °С, сек	Время охлаждения до 400 °С, сек	Время охлаждения до 200 °С, сек	Скорость охлаждения при 300 °С, °С/сек	Макс. скорость, °С/сек	Температура при макс. скорости, °С
Вода	3,78	5,05	7,77	82,41	270	640,76
Росойл-921 5%	4,39	5,66	8,29	83,28	240	637,04
Росойл-520 5%	14,7	17,33	20,1	78,15	104	431,67

Для установления связи между охлаждающими и триботехническими характеристиками водорастворимых СОЖ, применяемых в процессах металлообработки, авторы предложили способ оценки комплексной эффективности смазочно-охлаждающей жидкости в лабораторных условиях, учитывающий охлаждающие и триботехнические свойства СОЖ, которую можно рассчитать по формуле [7].

$$K = \frac{P_{с\text{ СОЖ}}}{P_{с\text{ вода}}} \times \frac{V_{\text{макс СОЖ}}}{V_{\text{макс вода}}} \times \frac{T_{\text{вода}}}{T_{\text{СОЖ}}} \times \frac{D_{и\text{ вода}}}{D_{и\text{ СОЖ}}}, \quad (2)$$

где $P_{с\text{ СОЖ}}$ – нагрузка сваривания, полученная с применением испытываемой СОЖ; $P_{с\text{ вода}}$ – нагрузка сваривания, полученная с применением воды; $V_{\text{макс СОЖ}}$ – максимальная скорость охлаждения, полученная с применением испытываемой СОЖ; $V_{\text{макс вода}}$ – максимальная скорость охлаждения воды; $T_{\text{вода}}$ – сила трения, полученная с применением воды; $T_{\text{СОЖ}}$ – сила трения, полученная с применением испытываемой СОЖ; $D_{и\text{ вода}}$ – диаметр пятна износа, полученный с применением воды; $D_{и\text{ СОЖ}}$ – диаметр пятна износа, полученный с применением испытываемой СОЖ.

Результаты определения комплексного показателя приведены в таблице 2.

Выбор данных параметров оценки СОЖ обоснован тем, что они отражают эффективность СОЖ по смазочному и охлаждающему действиям.

Наиболее эффективную СОЖ определяют по наибольшему значению коэффициента K .

Для определения комплексного показателя эффективности применялись пятипроцентные водные растворы СОЖ «Росойл-520» и «Росойл-921», а также водопроводная вода с жесткостью 7 мг-экв/л.

Для приготовления водных растворов СОЖ использовалась также водопроводная вода с жесткостью 7 мг-экв/л.

Анализ проведенных исследований данной показывает, что наиболее эффективной водорастворимой СОЖ по коэффициенту комплексной эффективности является СОЖ «Росойл-520, очевидно из-за высоких противозносных и антифрикционных свойств.

Таким образом, с помощью комплексного показателя можно прогнозировать в лабораторных условиях выбор наиболее эффективной СОЖ, применяемых в процессах металлообработки по охлаждающим, противозадирным, противозносным и антифрикционным характеристикам.

Табл. 2. Результаты оценки комплексного показателя для различных СОЖ

СОЖ	$P_{с}$, (Н)	$D_{и}$, (мм) (20 кгс, 1 час)	$V_{\text{макс}}$, (°C/сек)	T , (Н) (20кгс)	K
Вода	1060	1,74	270	3,40	1,00
Росойл-520 (5% эмульсия)	1120	0,96	104	0,70	2,42
Росойл-921 (5% эмульсия)	1060	1,42	240	1,80	1,85

Авторы работы считают, что при выборе СОЖ по предложенному показателю охлаждающие свойства СОЖ можно учитывать не только по максимальной скорости охлаждения, но по другим параметрам, например по температуре, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения.

Заключение

В качестве параметра оценки эффективности СОЖ в лабораторных условиях предложен способ комплексной оценки по коэффициенту K , величина которого учитывает противозадирные, противозносные, антифрикционные и охлаждающие свойства исследуемой СОЖ.

- [1] Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / под ред. А.В. Чичинадзе, М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
- [2] Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под общей ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. - М.: Машиностроение, 1986, - 352 с.
- [3] Патент РФ № 2699698. Установка для определения охлаждающей способности технологической среды / Шолом А.В., Поляков А.Б., Тюленев Д.Г., Иванов В.В., Волкова Е.Б., заявл. 12.07.2018; опубл. 09.09.2019, Бюл. № 25.
- [4] ISO 9950:1995(E). Industrial quenching oils Determination of cooling characteristics - Nickel-alloy probe test method. - Geneva: International Organization for Standardization, 1995. - 9 p.
- [5] ASTM D6482 - 06(2016) Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method), 2016. - 9 p
- [6] ASTM D6200 - 01(2017) Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, 2017. - 6 p.
- [7] Патент РФ № 2777395. Способ оценки комплексной эффективности смазочно-охлаждающей жидкости /Абрамов К.А., Шолом А.В., Пиллогин С.М. и др., заявл. 12.07.2021; опубл. 03.08.2022, Бюл. № 22.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТЕРМОСТОЙКИМИ ТЕРМОПЛАСТАМИ

¹Полунин С.В. *, ¹Горбунова И.Ю., ²Шапошникова В.В., ²Панова М.О., ¹Морозова П.А.

*E-mail: mcnion@gmail.com

¹ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Москва, Россия;

²ФГБУН «Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук»,
Москва, Россия.

В работе исследованы трибологические свойства отвержденной эпоксидной смолы, модифицированной аморфными термопластами: кардовым сополимером полисульфона и полиэфиримидом в количестве 5-20 массовых частей. В качестве отверждающего агента использовали 4,4'-диаминодифенилсульфон. Показано, что в присутствии термопластичных модификаторов трибологические свойства эпоксидных полимеров улучшаются по сравнению с чистой отвержденной смолой. Наблюдается снижение коэффициента трения и износа с увеличением содержания термопласта в эпоксидном полимере. Методом оптической микроскопии показана структура поверхности после трения для исследованных систем.

Ключевые слова: трибология, эпоксидная смола, термопласты, коэффициент трения, износ.

Введение

Эпоксидные смолы являются одним из самых широко применимых видов связующих для производства полимерных изделий. Однако чистые эпоксидные полимеры относительно хрупкие и по этой причине не отвечают современным требованиям промышленности [1]. Эпоксидные смолы чаще всего используются в качестве связующих для композиционных материалов с армирующим наполнителем [2]. Имеются исследования, посвященные трибологическим свойствам полимеров на основе эпоксидных смол. Для улучшения трибологических характеристик эпоксидный олигомер используют, как связующее для арамидных волокон [3], углетканей [4]. В некоторых работах велись исследования по модифицированию эпоксидного олигомера кристаллическими термопластами, такими как сверхвысокомолекулярный полиэтилен [5] и политетрафторэтилен [6]. В литературе содержится малое количество публикаций, посвященных модифицированию эпоксидных смол аморфными термопластами с целью улучшения

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF EPOXY POLYMERS MODIFIED BY THERMO-RESISTANT THERMOPLASTICS

Polunin S.V., Gorbunova I.Yu., Shaposhnikova V.V., Panova M.O., Morozova P.A.

Tribological properties of cured epoxy resin modified by amorphous thermoplastic cardo copolymer of polysulfone and polyetherimide in quantity of 5-20 p.b.w. were investigated. 4,4'-diaminodiphenylsulfone was used as curing agent. It was presented that in the presence of thermoplastic modifiers tribological properties of epoxy polymers improve compared to cured neat resin. It was found that friction coefficient and wear decline with increase thermoplastic content in epoxy polymer. By optical microscopy was shown the structure of surface after sliding for investigated systems.

Keywords: tribology, epoxy resin, thermoplastic, friction coefficient, wear.

трибологических свойств, хотя термопластичные модификаторы широко применяются для улучшения физико-механических и теплофизических свойств материалов на основе эпоксидной смолы [7].

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является исследование трибологических свойств эпоксидных полимеров, содержащих аморфные термостойкие термопласты. Задачи исследования включают в себя приготовление связующих на основе эпоксидного олигомера и термопластов, исследование влияния содержания термопласта на коэффициент трения и износ полученных материалов.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали эпоксидную смолу марки ЭД-20, отвердитель 4,4'-диаминодифенилсульфон (ДАДСФ) и термопластичные модификаторы: кардовый сополимер полисульфона марки ПСФФ-70К (АО «Институт пластмасс им. Г.С. Петрова») и полиэфиримид (ПЭИ) марки Ultem 1010 (Sabic). ПСФФ-70К совмещали с ЭД-20 при температуре 100 °С при помощи верхнеприводной мешалки,

ПЭИ – при температуре 180 °С до полного растворения, количество термопласта составляло от 5 до 20 массовых частей (м.ч.) на 100 м.ч. ЭД-20. ДАДФС подмешивали при температуре 120 °С в течение 30 минут. Отверждение проводили в термошкафу при температуре 180 °С в течение 8 ч.

Фрикционные кривые получали на торцевой машине трения типа И-47К54, схема которой приведена на рис. 1. Условия трения - скорость 0,5 м/с, давление 10 МПа. Для понижения фрикционного нагрева трение осуществляли контртелом с тремя стальными шариками (d = 5 мм, сталь 3х13). В качестве образцов использовали полимерные диски следующих размеров: D = 22 мм и h = 1,5 мм.

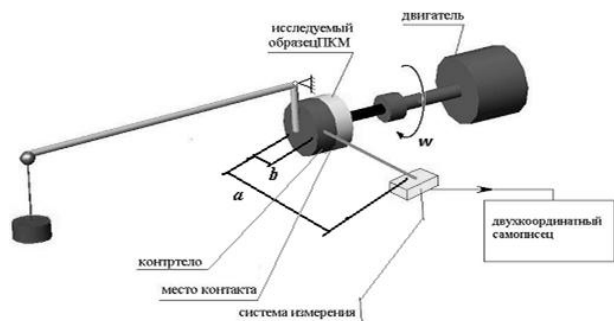


Рис. 1. Схема машины трения

Продолжительность испытаний составляла 30 минут. Взвешивание образцов проводилось на аналитических весах перед и после испытания для расчёта износа. По результатам испытания строили зависимость коэффициента трения от времени.

Также коэффициент трения можно рассчитать по формуле (1).

$$\mu = \frac{F_{тр.}}{N}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения, $F_{тр.}$ – сила трения, N – нормальная сила. Сила трения вычисляется по формуле (2).

$$F_{тр.} = \left(\frac{a}{b}\right) (V - V_0) / 0,24 / 1000, \quad (2)$$

где $\frac{a}{b} = 13,5$ – отношение длины рычага (а – расстояние от центра контр-тела до датчика, b – действующий радиус силы трения, рис. 1), V – значение напряжения выходного сигнала с датчика силы, мВ, V_0 – нулевое положение напряжения, мВ.

Исследование структуры поверхности после трения проводили на металлографическом инвертированном микроскопе Olympus GX 53.

Результаты и обсуждение

Чистая отвержденная эпоксидная смола при трении ведет себя трибоактивно [8], поскольку коэффициент трения повышается с течением времени (рис. 2, черная кривая). При добавлении термопласта коэффициент трения (μ) практически остается постоянным в течение испытания, как в случае с ПСФФ-70К (рис. 2, а), так и в случае с ПЭИ (рис. 2, б), при этом значительно снижается амплитуда колебаний коэффициента трения по сравнению с немодифицированной ЭД-20. Это позволяет сделать вывод о том, что системы ЭД-20-термопласт являются менее трибоактивными. Вероятно, изменение в трибологическом поведении у модифицированных эпоксидных полимеров связано с тем, что термопластичный модификатор выделяется в процессе отверждения в отдельную фазу, образуя частицы различного размера.

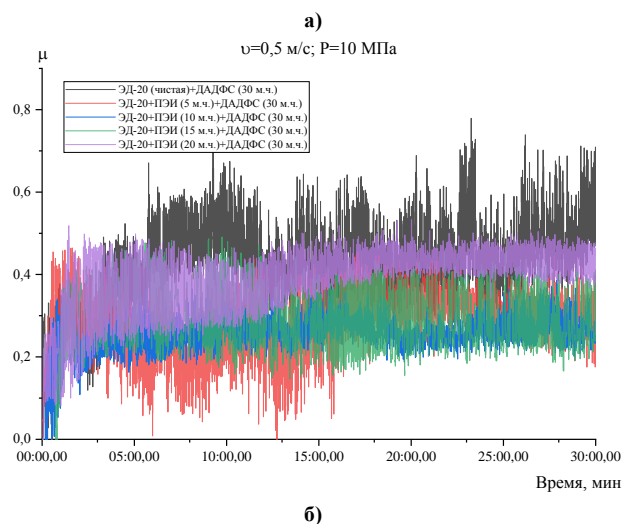
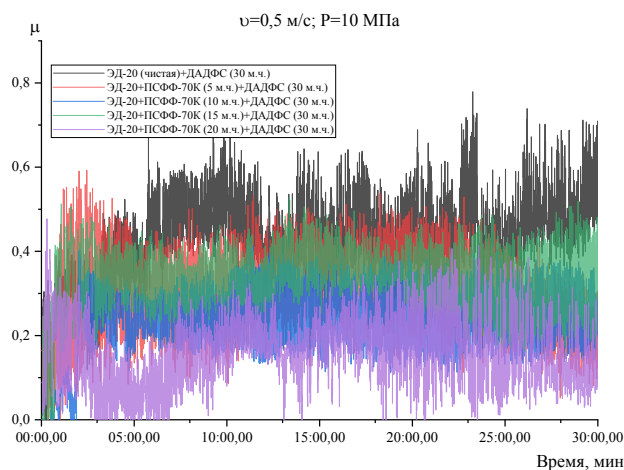
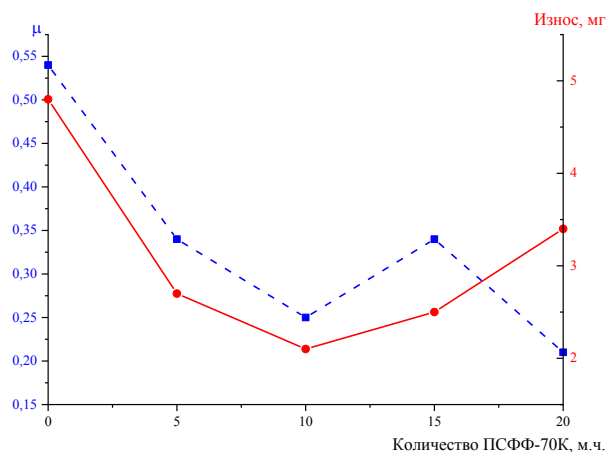
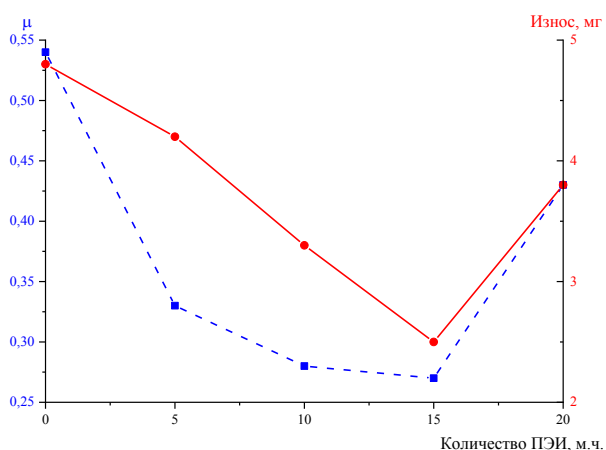


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (μ) от времени для эпоксидных полимеров, с различным содержанием ПСФФ-70К (а) и ПЭИ (б)

Коэффициент трения и износ снижаются с увеличением содержания термопласта в эпоксидном полимере (рис. 3). Износ снижается на 29-56 % для образцов с ПСФФ-70К и на 12-48 % для образцов с ПЭИ (табл. 1). Наибольшее снижение коэффициента трения по сравнению с чистой ЭД-20 смолой наблюдается у образца с содержанием ПСФФ-70К 20 м.ч. и у образца с 15 м.ч. ПЭИ.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость коэффициента трения (μ) и износа от количества ПСФФ-70К (а) и ПЭИ (б)

Табл. 1 Коэффициента трения (μ) и износ для эпоксидных полимеров с различным содержанием ПСФФ-70К и ПЭИ

Образец	μ	Износ, мг
ЭД-20 (чистая)+ДАДФС (30 м.ч.)	0,54	4,8
ЭД-20+ПСФФ-70К(5 м.ч.)+ДАДФС(30 м.ч.)	0,34	2,7
ЭД-20+ПСФФ-70К(10 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.)	0,25	2,1
ЭД-20+ПСФФ-70К(15 м.ч.)+ДАДФС(30 м.ч.)	0,34	2,5
ЭД-20+ПСФФ-70К(20 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.)	0,19	3,4
ЭД-20+ПЭИ (5 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.)	0,33	4,2
ЭД-20+ПЭИ (10 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.)	0,28	3,3
ЭД-20+ПЭИ (15 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.)	0,27	2,5
ЭД-20+ПЭИ (20 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.)	0,43	3,8

Подобное влияние введения термопластичного модификатора на трибологические свойства объясняется тем, что в процессе трения сначала подвергается износу поверхностный слой, содержащий только эпоксидную смолу, поскольку ни одна из систем не имеет нулевого износа. Далее контртело уже соприкасается с системой ЭД-20-термопласт.

Повышение коэффициента трения и износа у модифицированных систем при содержании термопласта 20 м.ч. объясняется неспособностью такого количества термопласта равномерно распределяться в матрице эпоксидной смолы, а также препятствием процессу отверждения в виду повышенной вязкости самого эпоксидного связующего при таком содержании термопласта. Поскольку вследствие разделения фаз имеется две фазы, одна из которых обогащена отвержденной смолой, а другая – термопластом, то можно сделать вывод о том, что частицы термопласта воспринимают на себя нагрузку при трении. Термопласты менее жесткие по сравнению с отвержденными смолами, поэтому в процессе трения контр-поверхность трётся о дискретную структуру, в которой чередуются жесткие реактопластичные фрагменты с менее жесткими термопластичными.

Системы с содержанием ПСФФ-70К свыше 10 м.ч. характеризуются нестабильным коэффициентом трения, в отличие от систем с ПЭИ, где снижение коэффициента трения происходит с увеличением содержания полимера вплоть до 20 м.ч. Это позволяет сделать вывод о том, что системы с ПЭИ менее трибоактивны по сравнению с образцами ЭД-20-ПСФФ-70К.

На микрофотографиях поверхности образцов после трения видно, что дорожка трения у чистой отвержденной ЭД-20 имеет практически гладкий рельеф, а при добавлении термопластов поверхность после трения становится более развитой (рис. 4).

Это также связано с образованием частиц термопласта в фазе эпоксидной смолы, индуцированным процессом отверждения. Более развитая поверхность после трения является следствием более глубоко истирания части образца, содержащим только отвержденную ЭД-20, а менее глубинные слои на дорожке трения следует отнести к частицам термопласта, содержащихся в реактопласте.

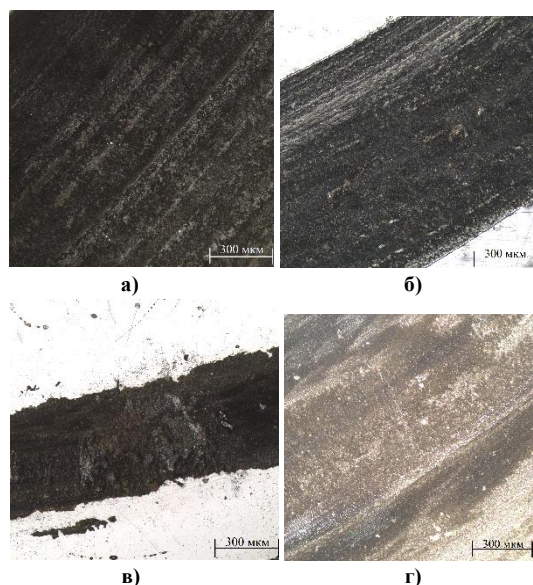


Рис. 4. Микрофотографии поверхности образцов после трения: а) ЭД-20 (чистая)+ДАДФС (30 м.ч.), б) ЭД-20+ПЭИ (15 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.), в) ЭД-20+ПСФФ-70К (10 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.), г) ЭД-20+ ПСФФ-70К (20 м.ч.)+ДАДФС (30 м.ч.)

Введение термопластичных модификаторов позволяет улучшать свойства эпоксидных полимеров, расширить сферы применения эпоксидных смол, в том числе и для применения в узлах трения, в которых нагрузка не превышает 10 МПа. Введением одновременно двух термопластов в эпоксидное связующее можно добиться более лучшего результата по повышению трибологических свойств конечных изделий.

Заключение

В работе исследованы трибологические свойства эпоксидных полимеров, содержащих термопластичный модификатор кардовый сополимер полисульфона и полиэфиримид. Показано, что введение термопластов в эпоксидную

смолу уменьшают коэффициент трения, износ и амплитуду колебаний коэффициента трения за счет выделения термопласта в отдельную фазу в процессе отверждения. Методом оптической микроскопии показано, что поверхность после трения у модифицированных эпоксидных полимеров имеет более развитую структуру по сравнению с чистой отвержденной ЭД-20.

Трибологические исследования проводились в ИНЭОС РАН в рамках государственного задания №075-00697-22-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

- [1] Wang J., Liu R., Jian X. Introduction to epoxy/thermoplastic blends //Handbook of Epoxy Blends. – 2017. – С. 429-458.
- [2] Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. – 5-е изд., испр. и доп. / под общ. Ред. А.А. Берлина. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2019. – 624 с.
- [3] Zhang G. et al. Tribological properties of the epoxy resin-based solid lubricant coating modified by Kevlar fibers //Industrial Lubrication and Tribology. – 2018. – Т. 70. – №. 9. – С. 1706-1713.
- [4] Антифрикционная композиция и способ её получения: пат. 2751337 Рос. Федерация. № 2020138922 / Черненко Д.Н., Черненко Н.М., Щербакова Т.С., Грудина И.Г., Назаров А.Н., Солдатов М.М.; заявл. 27.11.2020; опубл. 13.07.2021, Бюл. №20. 13 с.
- [5] Singh N., Sinha S.K. Tribological studies of epoxy composites with UHMWPE and MoS₂ fillers coated on bearing steel: dry interface and grease lubrication //Journal of Tribology. – 2020. – Т. 142. – №. 5. – С. 051902.
- [6] Shen J.T. et al. Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO₂ particles //Wear. – 2015. – Т. 322. – С. 171-180.
- [7] Kandpal J., B Yadav S., K Nagpal A. Mechanical properties of multifunctional epoxy resin/glass fiber reinforced composites modified with poly (ether imide) //Advanced Materials Letters. – 2012. – Т. 4. – №. 3. – С. 241-249.
- [8] Краснов А.П., Мить В.А., Афоничева О.В. Трибохимически активные и трибостабильные полимеры и полимерные системы // Трение и износ. -2002. - Т. 23. - № 4. - С. 397-410.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЛАТУНИ

¹Сачек Б.Я., ¹Мезрин А.М., ²Архипов В.Е., ²Москвитин Г.В. *, ²Пугачев М.С.

*E-mail: GVMoskvitin@yandex.ru

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва, Россия.

Приведены результаты испытания покрытия типа «латуни» в условиях смазки маслом I20A с добавками металлолакирующей присадки «Валена» при удельном давлении до 130 МПа. Показано отсутствие влияния присадок на интенсивность изнашивания, которая находится в пределах $0,5-12,0 \times 10^{-9}$ в диапазоне нагрузок 314-1884 Н. На основе анализа химического состава поверхности контртел показано отсутствие переноса металлов и даётся оценка влияния оксида алюминия.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, покрытие типа «латуни», структура, фазы, износ, микроспектральный анализ.

Введение

В научных и научно-технологических центрах стран Америки (США, Канада), Европы (Германия, Британия, Франция) и Азии (Япония, Китай, Индия) проводятся исследования по нанесению покрытий триботехнического назначения газодинамическим напылением с использованием установок низкого и высокого давления. В качестве наносимого материала применяются сплавы латуни, полученные или измельчённые до частиц необходимого размера, а также механические смеси частиц меди, цинка и оксида алюминия (корунда) [1].

Исследования покрытий, нанесённых с использованием механической смеси частиц меди, цинка и корунда показали наличие в нанесённом слое металла меди, цинка и фаз электронного типа на базе CuZn_3 (ϵ - фаза) и Cu_5Zn_8 (γ – фаза), присущих латуням, что даёт основание назвать покрытие типа «латуни» [2, 3].

Результаты испытания покрытия типа «латуни» в условиях масляного голодания (сухого трения) при комнатной температуре показали, что его износ в 4 раза меньше, чем у покрытия меди [4]. При этом, интенсивность изнашивания контртела на порядок ниже в паре с покрытием типа «латуни». Авторы

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE GAS-DYNAMIC COATING OF BRASS

Sachek B.Ya., Mezrin A.M., Arkhipov V.E., Moskvitin G.V., Pugachev M.S.

The results of testing the "brass" type coating under conditions of oil lubrication I20A with additives of the metal-coating additive "Valena" at a specific pressure of up to 130 MPa are presented. The absence of the effect of additives on the wear intensity, which is in the range of $0.5-12.0 \times 10^{-9}$, is shown. in the load range 314-1884 N. Based on the analysis of the chemical composition of the counterbody surface, the absence of metal transfer is shown and the influence of aluminum oxide is evaluated.

Keywords: gas-dynamic spraying, "brass" type coating, structure, phases, wear, microspectral analysis.

отмечают наличие массопереноса цинка и меди с покрытия на контртело, что и обуславливает столь высокие триботехнические характеристики поверхности трения [5].

Полученные результаты показывают необходимость продолжения исследований для оценки свойств покрытия типа «латуни» и возможности его применения в различных узлах трения скольжения.

Целью данной работы являлось исследование влияния условий испытания (смазочная среда, присадки и нагрузки) на износ покрытия типа «латуни», нанесённого газодинамическим напылением.

Материалы, методики, оборудование

Напыление покрытия на образцы, изготовленные из стали 40Х проводилось при температуре потока воздуха 450°С с использованием газодинамической установки модели «ДИМЕТ-404». Для напыления использовалась стандартная механическая смесь частиц меди, корунда (Al_2O_3) и цинка с исходным соотношением компонентов по массе – $\text{Cu}:\text{Zn}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 35\%:35\%:30\%$ (марка С-01-11) в состоянии поставки [6].

Трибологические испытания проводилось на трибометре Т-05 по схеме «колодка-ролик»: материал ролика (контробразца) – сталь ШХ15, колодка – сталь с исследуемым покрытием. Данная контактная пара исследовалась по ранее отработанной методике [7] с той разницей, что для испытаний со смазкой контробразец был частично погружен в смазку так, чтобы при вращении смазка захватывалась контробразцом и вовлекалась в зону контакта. В качестве смазки использовалось базовое масло И20А с добавкой металлоплакирующей присадки «Валена» (ТУ 0257-001-17368431-05) [8] в количестве, соответственно, 0,3%, 0,15% и 0,03%.

Изучение структуры и элементного состава покрытия проводится на сканирующем электронном микроскопе FEI «Quanta-650» с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализатором EDAX. В исследовании используется детектор обратно-отраженных электронов, позволяющий получать изображение с контрастом по атомному номеру и визуализировать различные фазы на поверхности образцов. Источником электронов в микроскопе служил вольфрамовый катод, ускоряющее напряжение составляет 25 кВ.

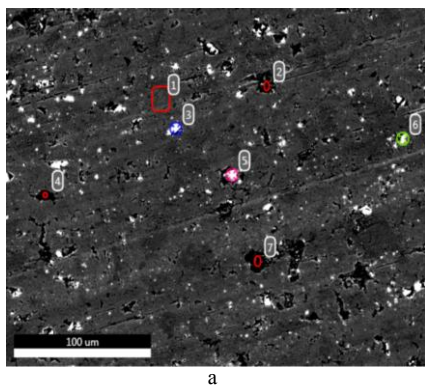
Результаты исследования

Микроспектральный анализ проведён на покрытии (колодке) и контртеле (ролике) в разных точках поверхности (рис. 1 а, б). Интенсивность изнашивания покрытия типа «латуни» при испытании пары в жидкой среде (масло И20А) значительно снижается с $2,88 \times 10^{-9}$ до $1,55 \times 10^{-9}$ при повышении удельного давления от 50,39 МПа до 86,6 МПа. При дальнейшем повышении нагрузки до 1256 Н (уд. давление 109,03 МПа) интенсивность изнашивания резко возрастает до $10,67 \times 10^{-9}$. Повышение контактного давления до 131,3 МПа сопровождается незначительным снижением интенсивности изнашивания до величины $10,67 \times 10^{-9}$ (табл.1).

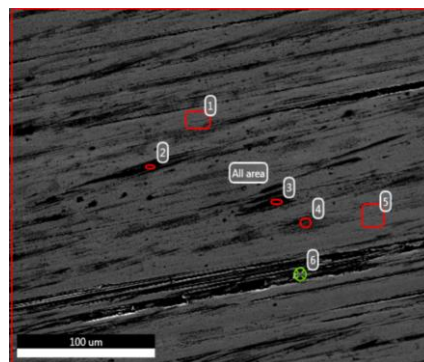
Испытания в масле И20А с добавками металлоплакирующей присадки «Валена» не изменяют характера интенсивности изнашивания в зависимости от величины нагрузки (рис. 2). При повышении нагрузки интенсивность изнашивания падает; затем она, хоть и не столь значительно, но повышается. Дальнейшее повышение нагрузки до 1884 Н сопровождается разной тенденцией в интенсивности изнашивания. При добавлении в масло присадки в количестве 0,15% интенсивность изнашивания понижается ($3,76 \times 10^{-9}$) и становится близкой к интенсивности изнашивания при минимальной нагрузке ($2,95 \times 10^{-9}$). Добавка металлоплакирующей присадки «Валена» в количестве 0,03% сопровождается повышением интенсивности изнашивания, которая достигает $8,92 \times 10^{-9}$ при контактной нагрузке 120,3 МПа.

Добавка присадки в количестве 0,3% приводит к наиболее значительной интенсивности изнашивания $12,0 \times 10^{-9}$ при максимальной нагрузке 1884 Н (табл. 2).

Спектральный анализ образца с покрытием после испытания показал присутствие меди и цинка (точка 1, табл. 2), массовая доля которых составляет 43,88% и 45,88%. Такому содержанию металлов соответствует область существования твёрдых растворов электронного типа на базе Cu_5Zn_8 (γ – фаза) и $CuZn$ (β' – фаза) [10]. Также спектральный анализ показывает наличие железа, массовая доля которого находится в пределах 0,09% - 7,66%, что говорит об истирании покрытия до подложки (табл. 3). Кроме того, в остальных точках выявляется значительное содержание кислорода и алюминия, что свидетельствует о наличии оксида алюминия (табл. 1). При этом, присутствии в спектре линий меди и цинка свидетельствует о том, что размеры частиц корунда незначительны, то есть меньше размера области инициирования спектра (менее 5 мкм).



а



б

Рис. 1. Микроспектральный анализ колодки - а и ролика – б после испытания

Табл. 1. Результаты испытания покрытия типа «латуни»

Нагрузка	Площадь контакта на конец эксперимента	Контактное давление	Коэф. трения	Инт. изн.
N, Н	S, мм ²	P, МПа	CoF	I*10 ⁻⁹
Масло И20А				
314	6,4	50	0,05	2,9
628	7,4	86	0,04	1,6
1256	11,7	109	0,03	10,7
1884	14,6	131	0,02	9,5
Масло И20А с 0,3% добавкой				
1884	25,4	75	0,05	12,0
Масло И20А с 0,15% добавкой				
314	7,7	41	0,05	2,9
628	7,8	81	0,04	0,5
1256	11,3	113	0,04	7,8
1884	15,6	122	0,03	3,7
Масло И20А с 0,03% добавкой				
314	6,0	53	0,04	4,4
628	8,4	76	0,03	1,7
1256	11,7	109	0,04	7,7
1884	16,0	120	0,03	8,9

Табл. 2. Результаты спектрального анализа

Хим. элементы	Места исследования, массовая доля%						
	1	2	3	4	5	6	7
O	5,76	38,11	40,97	23,44	41,04	40,82	33,56
Al	1,91	57,90	56,10	43,00	56,94	55,25	48,37
Fe	2,57	1,78	0,10	3,58	0,09	0,70	7,66
Cu	43,88	1,15	1,47	5,46	0,78	1,58	2,74
Zn	45,88	1,06	1,36	24,52	1,15	1,65	7,68

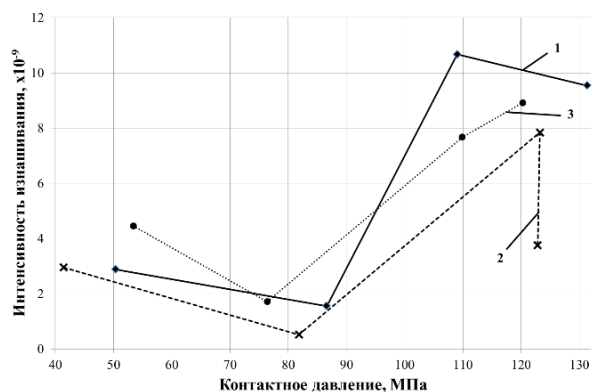


Рис. 2. Интенсивность изнашивания покрытия типа «латуни» в зависимости от нагрузки и среды испытания: 1 - масло И20А; 2 - масло И20А с 0,15% добавкой; 3 - масло И20А с 0,03% добавкой

Микроспектральный анализ поверхности ролика, проведённый после проведения испытаний, не выявляет наличия меди и цинка (табл. 3). Можно предположить, что при значительных удельных нагрузках, в отличие от ранее проведённых испытаний [4, 5] частички корунда воздействуют на сопряжённую поверхность как абразивный инструмент при «грубых» режимах обработки и устраниают медь и цинк.

Табл. 3. Результаты спектрального анализа ролика после испытания

Хим. элементы	Места исследования, массовая доля%					
	1	2	3	4	5	6
C	3,62	8,75	6,89	3,69	3,22	3,71
O	1,83	1,47	2,66	2,15	1,91	2,10
Si	0,11	0,08	0,08	0,03	0,11	0,08
Cr	1,42	1,31	1,40	1,39	1,44	1,38
Mn	0,58	0,48	0,55	0,44	0,39	0,43
Fe	92,47	87,50	88,10	92,01	91,69	91,89

Заключение

1. Поскольку на поверхности контртела не выявлено никаких следов сервоитной медной пленки, характерной для режима избирательного переноса, а интенсивность изнашивания напылённого медного покрытия как в нейтральной смазочной среде, так и в среде с аттестованной металлоплакирующей присадкой «ВАЛЕНА» при всех испытанных её концентрациях оказалась одинаковой, можно констатировать, что режим избирательного переноса ИП был подавлено каким-то контрпроцессом. Вполне вероятно, что непрерывное генерирование режима ИП постоянно обнуляется абразивным действием корунда (Al₂O₃), выполняющего функцию уплотнителя при напылении медного покрытия и составляющего значительную долю (~30%) наполняемой смеси.

2. Данное покрытие целесообразно использовать в трибосопряжениях, например, подшипниках скольжения при незначительных удельных нагрузках, например 10 МПа, и критерий теплостойкости для которых не превышает [PV] ≤ 100 МПа*м/с.

- [1] Биргер Е.М., Архипов В.Е., Поляков А.Н. Триботехнические и коррозионно – стойкие покрытия на основе меди и цинка: современное состояние технологии газодинамического напыления и основные свойства покрытий. //Упрочняющие технология и покрытия. – 2019. - №4. – С. 166-173.
- [2] Архипов В.Е., Муравьёва Т.И., Пугачев М.С., Щербакова О.О. Нанесение покрытия латуни методом газодинамического напыления // ФИХОМ. – 2020. – №2. – С. 18-25.
- [3] Архипов В.Е., Муравьёва Т.И., Пугачев М.С., Шкалей И.В. Влияние технологических параметров газодинамического напыления на структурно - фазовые превращения в покрытии типа «латуни» //Упрочняющие технология и покрытия. – 2020. – №12. – С. 554-560.
- [4] Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий / В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачев. М.: КРАСАНД, 2017. – 240 с.
- [5] Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Архипов В.Е., Лондарский А.Ф. Модифицирование поверхностей трибосопряжений напылением металлических покрытий как средство повышения их фреттингостойкости // Трение и износ. – 2018. – Т. 39. – №4. – С. 24-28.
- [6] Сачек Б.Я., Архипов В.Е., Мезрин А.М., Муравьёва Т.И., Щербакова О.О. Металлофизическое исследование кинетики фрикционного массопереноса напылённых мягких металлов антифрикционного назначения / Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин – М.: Ленанд, 2018. – С. 409-420.

[7] Димет. Применение технологии и оборудования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dimet-g.narod.ru/> - (Дата обращения 21.07.2022).

[8] Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Муравьева Т.И., Столярова О.О. Комплексная экспресс-оценка триботехнических свойств антифрикционных алюминиевых сплавов методом склерометрии // Трение и износ. – 2016. – Т.:37. – № 5. – С. 606-613.

[9] Мамыкин С.М., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Исследование триботехнической эффективности металлолакирующей присадки Валена в разных смазочных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – №2 – С. 56-64

[10] Ефремов Б.Н. ЛАТУНИ от фазового строения к структуре и свойствам. М.: ИНФРА-М. 2016. – 314 с.

АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ФРЕТТИНГ-ШУМА, АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Скворцов О.Б.

E-mail: oleg.b.skvorcov@gmail.com

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Рассмотрены вопросы сходства и различия задач аппаратурного обеспечения измерения высокочастотной вибрации, акустической эмиссии, фреттинг-шумов и ультразвукового неразрушающего контроля. Представлена оценка возможностей использования типовых решений, а также построения каналов измерения для таких задач.

Ключевые слова: вибрация, акустическая эмиссия, фреттинг, датчики, удар, динамический диапазон.

Введение

Создание аппаратурных и программных решений необходимо для обеспечения исследования и работы с высокочастотными сигналами от датчиков механических колебаний твердого тела. Такие решения необходимы при проведении экспериментов по анализу ударных импульсов и вибрационного отклика, при сборе и обработке данных акустической эмиссии, изучении фреттинг-коррозии, а также при решении задач неразрушающего контроля с использованием ультразвуковых технологий. Типовая структура компьютерной системы для решения этих задач показана на рис. 1. Для таких решений, в качестве согласующего устройства, можно использовать дешевый и надежный USB модуль сбора данных, например, NI USB 6009, который имеет большое входное сопротивление и реализует аналого-цифровое преобразование с частотой дискретизации более 200 килогерц.

В зависимости от исследуемого явления используются различные виды датчиков высокочастотных механических колебаний.

THE HARDWARE OF CONTROL OF FRETTING NOISE, ACOUSTIC EMISSION AND ULTRASOUND MEASUREMENTS

Skvortsov O.B.

The issues of similarity and differences in the tasks of the hardware of high-frequency vibration, acoustic emission, fretting noise and ultrasound non-destructive control are considered. An assessment of the possibilities of using typical solutions for constructing measurement channels for such problems is presented.

Keywords: vibration, acoustic emission, fretting, sensors, blow, dynamic range.

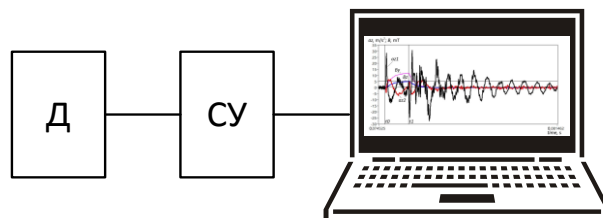


Рис. 1. Система сбора данных с датчика – Д. СУ –согласующее устройство

Датчики высокочастотной вибрации используются, например, при решении задач диагностики подшипников и зубчатых передач [1]. В качестве высокочастотных датчиков вибрации в этом случае используют пьезоэлектрические или микроэлектронные (МЭМС) акселерометры.

При исследовании акустической эмиссии [2] в качестве датчиков используют преобразователи акустической эмиссии по конструкции близкие к пьезоэлектрическим акселерометрам. При работе с акустической эмиссией также применяют МЭМС датчики [3]. Процессы генерации сигналов акустической эмиссии и фреттинг-шума часто рассматривают как имеющие общие

механизмы [4, 5]. Это позволяет использовать для их исследования общие технические решения. При использовании методов связанных с применением ультразвуковых колебаний [6, 7] также широкое применение получили пьезоэлектрические датчики. Необходимо отметить, что во многих случаях в качестве дешевого и простого решения может быть использование миниатюрного МЭМС микрофона.

Кроме контроля в перечисленных случаях высокочастотных колебаний материала часто необходимо синхронно оценивать имеющиеся динамические нагрузки, например, низкочастотную вибрацию или удары. Такие низкочастотные нагрузки часто являются необходимым условием возникновения акустической эмиссии, фреттинг-коррозии или вибрационного высокочастотного отклика на ударное воздействие. Ниже рассмотрена возможность выбора общих технических решений для контроля низкочастотных и высокочастотных процессов в материале.

Аппаратурные средства контроля

Методы контроля состояния элементов машин и механизмов на основе измерения высокочастотной вибрации, акустической эмиссии, фреттинг-шума, а также неразрушающего ультразвукового контроля ориентированы на решение задач диагностики и прогнозирования по результатам периодического или непрерывного мониторинга. Структура канала измерения в этих случаях проста и включает датчик Д, устройство согласования СУ, обеспечивающее усиление и выделение сигнала с датчика, а также реализующее функции преобразования и передачи данных с датчика в компьютер, и показана на рис. 1. Частотный диапазон сигналов с датчика для указанных задач начинается с единиц килогерц и может достигать сотен килогерц. Поскольку большинство функций фильтрации и анализа удобно реализовать программными средствами на компьютере, в качестве согласующего устройства можно использовать простой одноканальный модуль сбора данных (рис. 1). Часто решается задача определения положения источника сигнала акустической эмиссии, фреттинг-шумов, вибрации, ударных процессов или отражающей звуковые волны неоднородности при ультразвуковой дефектоскопии. В этом случае необходимо использование датчиков с отсутствием или низким уровнем поперечной чувствительности. Эффективно в таких случаях использование трехкомпонентных датчиков колебаний, которые позволяют снизить паразитные поперечные чувствительности и локализовать направление на источник колебаний [8-10].

Если необходимо обеспечить параллельный контроль низкочастотных деформаций и т.п. динамических данных, позволяющих получить дополнительную информацию о процессах возбуждения высокочастотных колебаний, разрешающая способность согласующего устройства может оказаться недостаточной. Если в качестве датчика используется высокочастотный акселерометр, желательно сформировать из его выходных сигналов дополнительные сигналы перемещения на выходе аналогового двойного интегратора или интегрирующего звена второго порядка [11-13]. В этом случае структуру измерительного канала соответствует схеме на рис. 2, Ортонормализацию сигналов, если она необходима, можно реализовать в программе ввода данных с согласующего устройства. Низкочастотные сигналы при интегрировании существенно усиливаются. За счет этого обеспечивается возможность их выделения над уровнем шума, поскольку практически невозможно реализовать высокочастотный датчик с высокой чувствительностью, для получения которой необходима большая встроенная инерционная масса.

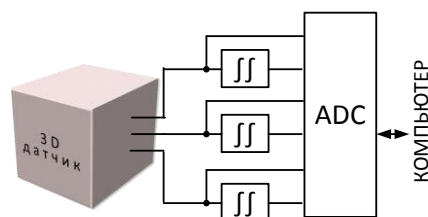


Рис. 2. Канал сбора данных об аддитивной смеси низкочастотных и высокочастотных колебаниях при использовании трехкомпонентного высокочастотного датчика

Использование датчиков с малой инерционной массой позволяет увеличить частоту собственного резонанса датчика и получить более высокую резонансную частоту канала. Стремление уменьшить инерционную массу, действующую на пьезоэлектрический элемент датчика, привело к появлению датчиков без инерционной массы. В таких датчиках роль инерционной массы выполняет сам пьезоэлектрический элемент. Преобразователи акустической эмиссии реализуют в виде такой конструкции. Исключение инерционной массы приводит к снижению чувствительности датчика и росту влияния на его характеристики внешних влияющих факторов.

Работа датчиков для исследования высокочастотных процессов тесно связана с его резонансными свойствами.

Сравнение и обсуждение

На рис. 3 представлена амплитудно-частотная характеристика датчика движения (акселерометра). Такой датчик имеет линейную рабочую область 1 с приблизительно постоянным коэффициентом преобразования. В области собственного резонанса 2 наблюдается существенный (порядка 10 раз) подъем чувствительности и последующий спад в зарезонансной области 3. Использование акселерометров для сбора данных о колебаниях с частотами в области резонанса обеспечивает высокую чувствительность, но приводит к погрешностям оценки уровня, а также связано с возможной перегрузкой измерительного канала. Кроме собственного резонанса на рабочую характеристику акселерометра влияет и наличие установочного резонанса. Чтобы он не влиял на результаты измерения необходимо принимать ряд мер по выбору способов крепления и установки датчиков вибрации [14, 15]. Акселерометр при этом можно использовать для контроля колебаний в зарезонансной области. Здесь его характеристика зависит от частоты и его выходной сигнал близок к сигналу от датчика скорости (велосиметра).

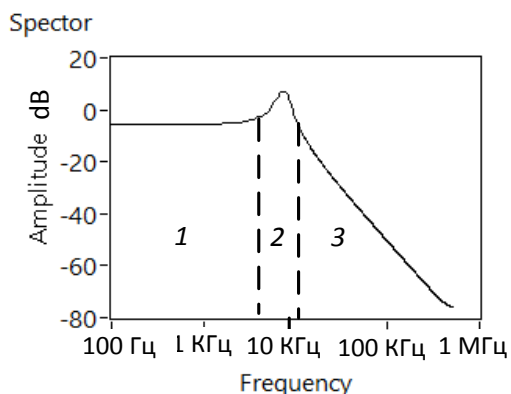


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика инерционного датчика движения

Хотя по своей конструкции и принципу действия акселерометры для измерения высокочастотной вибрации и преобразователи акустической эмиссии похожи, между ними есть функциональное отличие. Высокочастотные акселерометры конструируют так, чтобы обеспечить более широкий частотный диапазон. В этом рабочем диапазоне частот коэффициент преобразования постоянный и не зависит от частоты. Это позволяет при их использовании получать достоверную информацию об уровне вибрационных составляющих, независимо от их частоты в пределах частотного диапазона. В преобразователях акустической эмиссии, работающих на более

высоких частотах, обеспечить для всего частотного диапазона постоянство коэффициента преобразования сложно. Затруднительно и проведение снятия амплитудно-частотных характеристик таких датчиков на высокой частоте. Поэтому вместо калибровки каналов с использованием эталонных источников акустической эмиссии, согласующий усилитель канала калибруют с использованием электронного имитатора сигнала от датчика. При таких особенностях калибровку выполняют на одной или нескольких опорных частотах. Измерение уровня акустической эмиссии выполняется в предположении, что импульсный характер процесса акустической эмиссии характеризуется на высоких частотах постоянным по частоте амплитудным спектром. Во многих случаях формы импульсов постоянство амплитуды спектра действительно наблюдается, как показано на рис. 4.

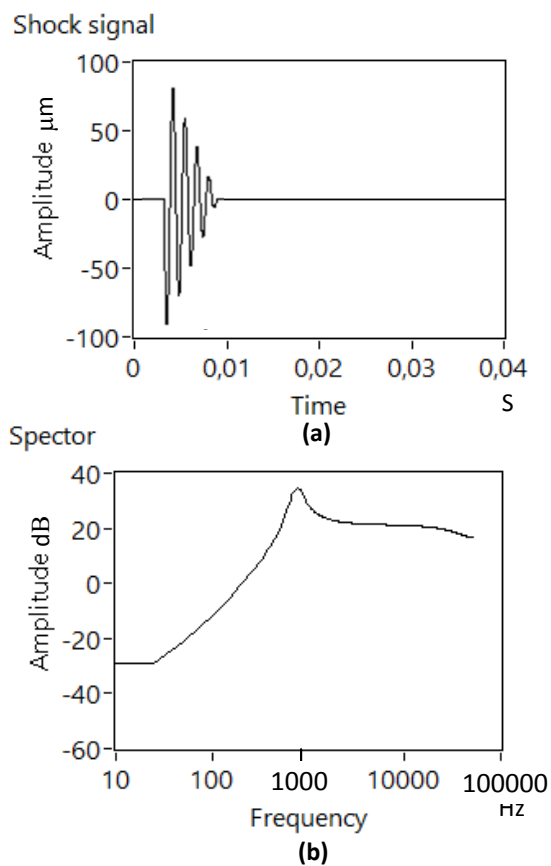


Рис. 4. Импульсный сигнал перемещений (а) и амплитудный спектр ускорений (б)

Если при измерениях высокочастотными акселерометрами предполагается линейная постоянная амплитудно-частотная характеристика и произвольный по частоте спектр вибрации, то при использовании преобразователя акустической эмиссии амплитудно-частотная характеристика

датчика и канала неравномерна, но частотный спектр импульса акустической эмиссии близок к постоянному линейному значению. Такие особенности контроля акустической эмиссии затрудняют получение достоверных оценок абсолютной амплитуды механических колебаний поверхности и часто используют относительные измерения оценки изменений уровня в децибелах. Также используют другие метода анализа, менее чувствительные к амплитудным погрешностям. Примерами таких методов является подсчет числа импульсов превышающих заданный порог.

Высокочастотный акселерометр, с учетом изложенного, можно использовать для контроля, как сравнительно низкочастотной вибрации, так и высокочастотных колебаний. В том числе и в относительных единицах измерения и связанных с акустической эмиссией, фреттинг-шумами или ультразвуковыми колебаниями. Низкочастотные составляющие вибрации после двойного интегрирования соответствуют перемещениям (деформациям) материала, которые могут быть причиной механических источников повреждений материала.

Использование для одновременного контроля, как в области низких частот, так и высокочастотных процессов, датчиков, основанных на контроле деформации чувствительного элемента (вихретоковые и емкостные проксиметры или тензорезистивные датчики деформации), для высокочастотного мониторинга затруднительно из-за очень малой величины высокочастотных деформаций.

Использование МЭМС микрофонов и специализированных МЭМС преобразователей акустической эмиссии для контроля низкочастотных вибрационных процессов не эффективно, что ограничивает возможность их применения для комплексного мониторинга рассматриваемых процессов. Применение для этих же целей миниатюрных и дешевых МЭМС акселерометров ограничивается отсутствием у них сколько-нибудь заметной чувствительности в резонансной области амплитудно-частотной характеристики.

Заключение

Высокочастотные акселерометры можно использовать для мониторинга процессов акустической эмиссии и фреттинг-шумов поскольку они позволяют:

- контролировать низкочастотные процессы вибрации, вызывающие процессы деформирования материала;

- измерять уровни высокочастотных механических колебаний связанных с акустической эмиссией и фреттинг-шумами в низкочастотной части их спектра;
- следить за изменениями уровня высокочастотных вибраций и ударных процессов в области верхних частот рабочего диапазона частот акселерометра или используя его область резонанса;
- контролировать изменения уровня сигналов или использовать частотно-импульсные методы анализа таких сигналов акустической эмиссии или фреттинг-шумов в высокочастотной части их спектра.

Автор благодарит д.т.н., профессора Албагачиева А.Ю. за проявленный интерес к затронутым вопросам, что стало причиной подготовки данной статьи.

- [1] Skvorcov O. B. Selection of vibration norms and systems structures when designing means of monitoring units with gear transmissions //New Approaches to Gear Design and Production. – Springer, Cham, 2020. – С. 495-511.
- [2] Carpinteri A., Lacidogna G. Acoustic emission and critical phenomena: from structural mechanics to geophysics // Taylor & Francis Group, London, UK, 2008. – 267 с.
- [3] Omori T. et al. Elastic wave measurement using a MEMS AE sensor //Applied Sciences. – 2017. – Т. 7. – №. 7. – С. 737.
- [4] Wade A. et al. Real-time fretting loop regime transition identification using acoustic emissions //Tribology International. – 2020. – Т. 145. – С. 106149.
- [5] Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Сарычев Г.А., Щавелин В.М. Акустическая эмиссия при трении // М.: Энергоатомиздат, 1998. – 256 с.
- [6] Асташев В.К., Крупенин В.Л. Нелинейная динамика ультразвуковых технологических процессов // М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2016. – 372 с.
- [7] Nakamura K. Ultrasonic transducers. Materials and design for sensors, actuators and medical applications. // Woodhead Publishing Limited, 2012. – 743 с.
- [8] Скворцов О.Б. Управление векторной чувствительностью многокомпонентных датчиков пространственных величин // Приборы. – 2017. – № 8(206). – С. 19-28.
- [9] Скворцов О.Б. Ограничение точности при измерении пространственных величин с ортонормализацией // АСТ. – 2019. Т. 73. – № 5. – С. 217-223.
- [10] Патент RU 2658568, 2018.
- [11] Патент RU 2644620, 2018.
- [12] Патент RU 2658569, 2018.
- [13] Патент RU 2658570, 2018.
- [14] Chu A. Problems in high-shock measurement // TP308, Endevco, San Juan Capistrano, CA, USA, 2021, – 10 с.
- [15] Dumont M., Cook A., Kinsley N. Acceleration measurement optimization: mounting considerations and sensor mass effect //Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 10. – Springer, Cham, 2016. – С. 61-71.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Скворцов О.Б.

E-mail: oleg.b.skvorcov@gmail.com

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Рассмотрены возможности использования средств виброакустической диагностики при исследовании происходящих в материалах механических процессов, которые сопровождаются ударами, акустической эмиссией и фреттинг-коррозией. Использование средств и методов высокочастотного вибрационного мониторинга позволяет унифицировать сбор и анализ данных в таких случаях.

Ключевые слова: циклическое нагружение, шум, ударный процесс, фильтрация, фреттинг, акустическая эмиссия, диагностика, спектр.

Введение

Конструкционные материалы элементов оборудования в процессе эксплуатации испытывают действие статических и динамических нагрузений, вызывающих зарождение и развитие различных дефектов, снижающих прочность. Эти процессы часто сопровождаются возбуждением в материале колебательных процессов с частотами существенно более высокими, чем частота внешних силовых воздействий. Вибрационный и акустический отклик на действие механических нагрузок находит применение в различных способах виброакустической диагностики [1-3]. Использование для диагностики и мониторинга более высокочастотных составляющих виброакустического отклика привело к разработке методов акустической эмиссии [4, 5]. Применение методов высокочастотной виброакустической диагностики и акустической эмиссии основано на анализе отклика на ударные механические процессы в элементах контролируемого оборудования. В этих случаях в материале наблюдаются случайные ударные процессы, сопровождаемые генерацией высокочастотных механических колебаний [6-9]. Модели таких процессов, пример которых представлен на рис. 1, служат основой анализа для решения задач диагностики. Генерация колебаний сопровождается образованием дефектов и их развитием. Ударное взаимодействие контактирующих поверхностей различных тел или частей одного и того же тела, например, сторон

HIGH-FREQUENCY VIBRO-ACOUSTIC DIAGNOSIS AND MONITORING OF STRUCTURAL MATERIALS

Skvortsov O.B.

The possibilities of using the means of vibroacoustic diagnostics in the study of mechanical processes occurring in materials, which are accompanied by impacts, acoustic emission and fretting corrosion, are considered. The use of means and methods of high-frequency vibration monitoring makes it possible to unify the collection and analysis of data in such cases.

Keywords: cyclic loading, noise, shock process, filtering, fretting, acoustic emission.

трещины, может рассматриваться и как источник шумовых сигналов в процессах фреттинг-коррозии [10]. Наличие фреттинг-коррозии при циклическом нагружении сопровождается существенным (в 2,5-5 раз) снижением порога усталостной прочности [11].

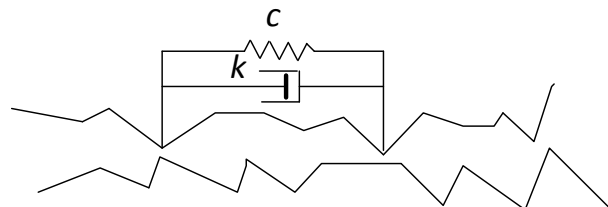


Рис. 1. Модель генерации акустического сигнала с упруго связанными пятнами контакта на поверхности материала

Низкочастотная вибродиагностика связана с анализом гармоник вибраций, возбуждаемых в оборудовании и материалах, например, гармоник обратной частоты. Рассматриваемые случаи высокочастотной виброакустической диагностики ориентированы на анализ ударных процессов с широким частотным спектром вибрационного и акустического отклика. При этом первопричиной таких ударных процессов может быть низкочастотная вибрация или соударение. Они вызывают деформацию материала или участков из-за контактного взаимодействия. Представляется интересным формулирование требований к организации процесса измерения для таких процессов с использованием средств виброакустического контроля.

Материалы и методы

При исследовании ударных процессов вибрации, акустической эмиссии, фреттинг шумов нашли применение датчики на основе пьезоэлектрических элементов, позволяющие контролировать колебания в широком диапазоне частот. При этом существенная часть спектра может находиться в относительно низкочастотной области в пределах нескольких килогерц [7, 8]. «Благодаря этому для контроля колебаний материала можно использовать акселерометры вместо специализированных преобразователей акустической эмиссии. При этом обеспечивается возможность контроля абсолютного уровня сигналов, как по пиковым, так и по среднеквадратичным значениям. Это существенно из-за больших значений коэффициента эксцесса и пик-фактора для таких сигналов. Поскольку в каналах контроля по вибрационной скорости или по вибрационному перемещению сильно ослабляются частотные составляющие с частотами в несколько килогерц, такие каналы малопригодны для мониторинга ударных процессов, сопровождающих фреттинг-коррозию. Такие каналы могут быть использованы для контроля перемещений (деформаций) в материале и соединениях, которые являются причиной возникновения фреттинг-коррозии. Таким образом, виброакустический мониторинг можно использовать для исследования процессов формирования фреттинг-шумов и акустической эмиссии.

Следует отметить, что сам по себе контроль вибрации с целью её ограничения и снижения, может служить эффективным способом борьбы с фреттинг-коррозией материала.

При создании системы виброакустического мониторинга возникает проблема калибровки каналов высокочастотными ударными импульсами. В случае использования вибрационных датчиков можно воспользоваться испытаниями на ударных стендах или имитацией процесса удара на вибрационном стенде. В этом случае крайне затруднительно получить вибрационный отклик с частотами выше десяти килогерц из-за свойств стенда. Несколько лучшие результаты обеспечивает использование пьезоэлектрических вибрационных стенов, но и они ограничены полосой частот в 20-30 КГц. При калибровке каналов мониторинга акустической эмиссии находят применение электрические эквиваленты сигнала преобразователя акустической эмиссии. Такие имитаторы позволяют получить сигнал для калибровки канала без датчика. Использование

миниатюрных генераторов ультразвуковых колебаний позволяет сформировать ударный процесс с высокой частотой колебаний. Например, применение элемента [12] позволяет получить колебания с частотой 143 КГц, что обеспечивает формирование сигналов с частотами типичными и для акустической эмиссии.

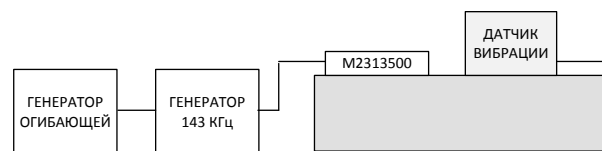
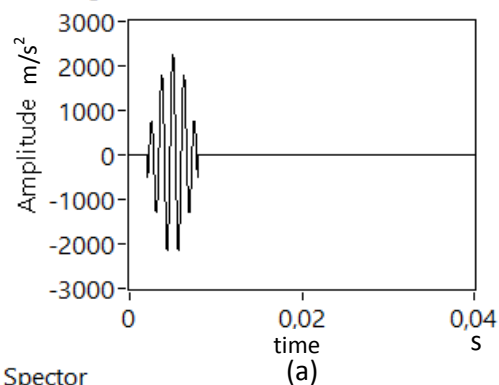


Рис. 2. Схема калибровки датчика вибрации ударом с высокой частотой колебаний. Жесткость упругого элемента s , коэффициент демпфирования k

Shock signal acceleration



Spectror

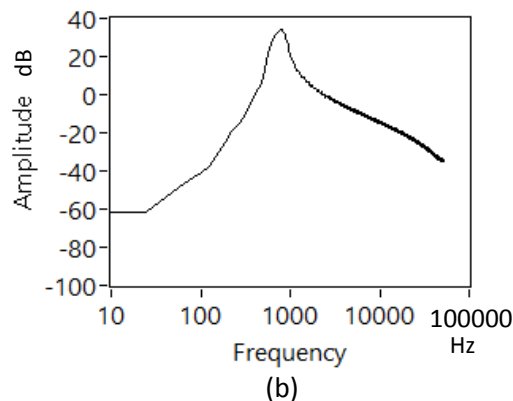


Рис. 3. Форма ударного импульса (а) и спектр такого сигнала (b) при частоте высокочастотных колебаний 1000 Гц

При такой калибровке схема генерации высокой частоты [12] должна быть дополнена схемой генерации огибающей ударного импульса, как показано на рис. 2. Для огибающей в виде полупериода синусоидального сигнала форма ударного импульса ускорения и соответствующий спектр представлены на рис. 3.

Результаты и обсуждение

Акустическая эмиссия – процесс генерации виброакустических импульсных колебаний при образовании и развитии дефектов, например,

микротрещин на поверхности материала в условиях воздействия механических напряжений. Механические напряжения могут быть статическими или динамическими и связаны с действием внешних сил или ускорений на материал. Один из механизмов формирования акустической эмиссии – трение краев трещины между собой при деформациях материала в условиях динамических механических напряжений. Фреттинг-коррозия – процесс разрушения материала в малоподвижных сочленениях элементов в условиях воздействия вибрационных перегрузок.

Процесс генерации высокочастотных вибрационных и акустических колебаний определяют;

- Механические удары;
- Высокочастотная вибрация;
- Кавитация (пузырьковая);
- Электромеханические процессы в металлах.

Генерация высокочастотной вибрации обычно снижает прочность материала, но в некоторых случаях возможно и упрочнение материала.

Некоторые явления, например, релаксация остаточных напряжений, свойственные электропластическому эффекту, наблюдаются и в случаях электрического воздействия вне зоны механической деформации, или в случае воздействия на испытываемый металл постоянным током, как например, [13]. Авторы работы указывают на возможное объяснение влиянием «электронного ветра». Явление подавления постоянным или импульсным электрическим током прерывистой деформации можно объяснить на основе теории дислокаций. Дислокации - линейные дефекты кристаллической решетки металла - являются носителями пластической деформации. Более вероятным является проявление вибропластического эффекта в условиях воздействия значительных виброперегрузок.

Анализ уровня виброперегрузок при исследовании акустической эмиссии показывает, что абсолютная величина таких перегрузок имеет большую величину. Такие виброперегрузки связаны с локальным действием значительных механических напряжений. Локальное действие перегрузок на высокой частоте может быть причиной снижения прочности и развития повреждений. На рис. 4 приведены оценки областей, контролируемых при различных видах мониторинга, по величинам вибрационной перегрузки и по частотному диапазону.

Значительные уровни вибрационного ускорения высокочастотных составляющих при

акустической эмиссии и фреттинг-коррозии предполагается исследовать при проведении последующих экспериментальных исследований.

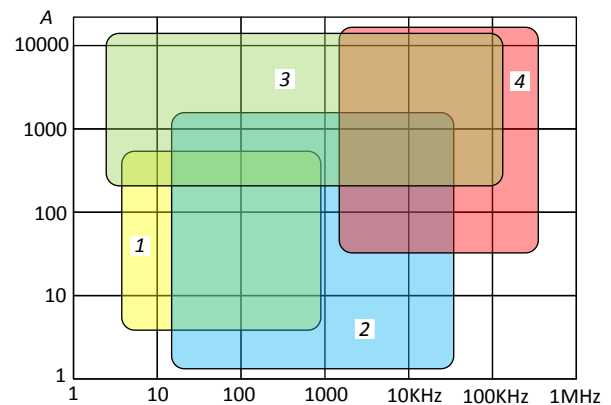


Рис. 4. Ориентировочные области частоты и вибрационной перегрузки для нормированного вибрационного контроля – 1, виброакустической диагностики – 2, испытаний на ударные воздействия – 3, а также акустической эмиссии – 4.

Заключение

Современные решения, используемые при виброакустической диагностике механизмов и машин в значительной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к выполнению измерений с ударными воздействиями, типовым решениям виброконтроля, а также могут быть применены для мониторинга процессов акустической эмиссии и фреттинг-шумов для их низкочастотной части спектра. Это обеспечивает возможность их использования для комплексного мониторинга вибрационного воздействия и высокочастотного отклика на такое вибрационное воздействие. Учитывая высокую вероятность влияния резонансов на такие измерения отклика при организации измерений необходимо обеспечить контроль за отсутствием перегрузки измерительных каналов ускорения.

Автор благодарит д.т.н., профессора Албагачиева А.Ю. за проявленный интерес к затронутым вопросам, что стало причиной подготовки данной статьи.

- [1] Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов // М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
- [2] Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин // Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
- [3] Русов В.А. Спектральная вибродиагностика // 1996. – 120 с.
- [4] Usgame Sandoval H.M., Pedraza Ramirez C.A., Quiroga Mendez J.E. Acoustic emission-based early fault detection in tapered roller bearings //Ingeniería e Investigación. – 2013. – Т. 33. – №. 3. – С. 5-10.
- [5] Махутов Н.А. Методы акустической эмиссии и модели механики разрушения - основы акустико-эмиссионной диагностики и мониторинга // Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. – С. 3-4.

- [6] Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Вагин И.Н., Сизова О.В. Генерация звука при трении скольжения // Письма в ЖТФ. – 2005. Т. 31. – Вып.19. – 8 с.
- [7] Сергиенко В.П., Бухаров С.Н. Вибрация и шум в нестационарных процессах трения // Минск: Беларус. навука, 2012. – 346 с.
- [8] Zaspá Y. et al. Exchange interaction and models of contact generation of disturbances in tribosystems // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2020. – Т. 4. – №. 5-106. – С. 25-34.
- [9] Колесников В.И., Сергиенко В.П., Бухаров С.Н., Сычѳв А.П., Сергиенко В.В. Оптимизация динамических характеристик фрикционных материалов и их роль в шумообразовании при

- трении // Вестник южного научного центра РАН. – 2009. – Т. 5. – № 4. – С. 3-14.
- [10] Блехман И. И. и др. Об износе оборудования в условиях вибрации и ударных нагрузок // Вестник научно-технического развития. – 2018. – №. 11. – С. 3-14.
- [11] Zhou R. Fissuration induite en petits debattements: application au cas d'alliages d'aluminium aeronautiques // l'universite de Jiaotong du sud-ouest (R.P. de Chine), 1992. – 165 с.
- [12] Ultrasonic Vibration Micro Nozzle M2313500 // S. Square Enterprise Company Limited, Pro-Wave Electronics Corporation. 2019. – 1 с.
- [13] Патент RU 2544721 C2, C22F 1/047, 2015.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СТЕНДОВ

Смирнов Н.И.* , Смирнов Н.Н.

*E-mail: smir1947@yandex.ru

ИМАШ РАН, г. Москва, Россия.

Предлагается комплексный подход к проектированию испытательных стендов для исследования трибодинамических процессов механической системы – центробежного лопастного насоса. Структура состоит из стендов для испытаний насосной секции, ступени, подшипников, уплотнений и материалов. В стендах реализуется синхронная и асинхронная прецессия вала. Применяются единые конструкторско-технологические решения.

Ключевые слова: центробежный лопастной насос, испытательный стенд, износ, динамика.

Введение

При проектировании стендов для трибологических испытаний их конструкция в основном определяется механизмом трения и видом кинематической пары [1]. В случае исследования трибологической надежности механической системы, которая содержит несколько различных трибологических объектов, взаимовлияющих друг на друга и подверженных динамическим нагрузкам, использовать универсальные машины трения становится затруднительно. Необходима разработка комплекса специальных испытательных стендов, позволяющих исследовать различные кинематические пары с широким диапазоном условий опыта.

Объект исследования

Объектом исследования является центробежный лопастной насос для добычи нефти

AN INTEGRATED APPROACH TO THE DESIGN OF TRIBOLOGICAL STANDS

Smirnov N.I., Smirnov N.N.

A comprehensive approach to the design of test benches for the study of tribodynamic processes of a mechanical system – a centrifugal vane pump - is proposed. The structure consists of test benches for the pump section, stage, bearings, seals and materials. Synchronous and asynchronous shaft precession is implemented in the stands. Unified design and technological solutions are used.

Keywords: centrifugal vane pump, test bench, wear, dynamics.

(ЭЛН). ЭЛН является трибодинамической системой и состоит из нескольких насосных секций, в состав каждой из них входят следующие трибосопряжения: трибосопряжения ступени нефтяной (СН), радиальные подшипники скольжения, упорный подшипник скольжения, торцовое уплотнение. Каждая ступень имеет радиальное и осевое уплотнение. На основании обработки статистики отказов выявлено, что основными механизмами изнашивания являются абразивный износ, гидроабразивный (эрозионный) износ. Работа трибосопряжений происходит в условиях динамических нагрузок, вызванных износом. Кроме того, в маслозаполненной гидрозашите реализуется гидродинамический режим смазки в упорном подшипнике.

Методология разработки стендов предполагает единство требований к их структуре.

Испытания насосных секций, ступеней, подшипников должны проводиться с использованием жидкости, максимально похожей на реальную пластовую жидкость, при ускоряющей процедуре и минимальных издержках. Для этого необходимо обосновать схемы основных процессов:

- оптимальный выбор объекта испытаний, трибологические характеристики которого определяющим образом влияют на ресурс установки, и спектр нагрузок, обусловленных взаимодействием объекта с другими элементами;
- схему подготовки и подачи абразива заданной концентрации в зону трения и обеспечение воспроизводимых свойств в процессе опыта;
- надежное обеспечение параметров испытаний – частоты вращения, температуры жидкости, нагружающих сил, точности измеряемых параметров, выбор единой системы измерения и обработки сигналов.

Радиальные размеры основных трибологических объектов позволяют использовать для испытаний натурные образцы.

Разработанная структура стендов для испытаний трибодинамической системы ЭЛН включает шесть стендов, рис. 1. Справа от объекта на рисунке указаны задачи исследования.

В качестве базовой системы измерения трибологических параметров комплекса стендов выбран программно-аппаратный комплекс фирмы National Instruments, в том числе с использованием контроллера реального времени для стенда испытаний насосных секций. Измерительная система стендов для исследования трения и износа ступеней, радиальных подшипников, упорных подшипников, уплотнений и материалов построена на базе современной - модульной платформы сбора данных NI Compact DAQ.

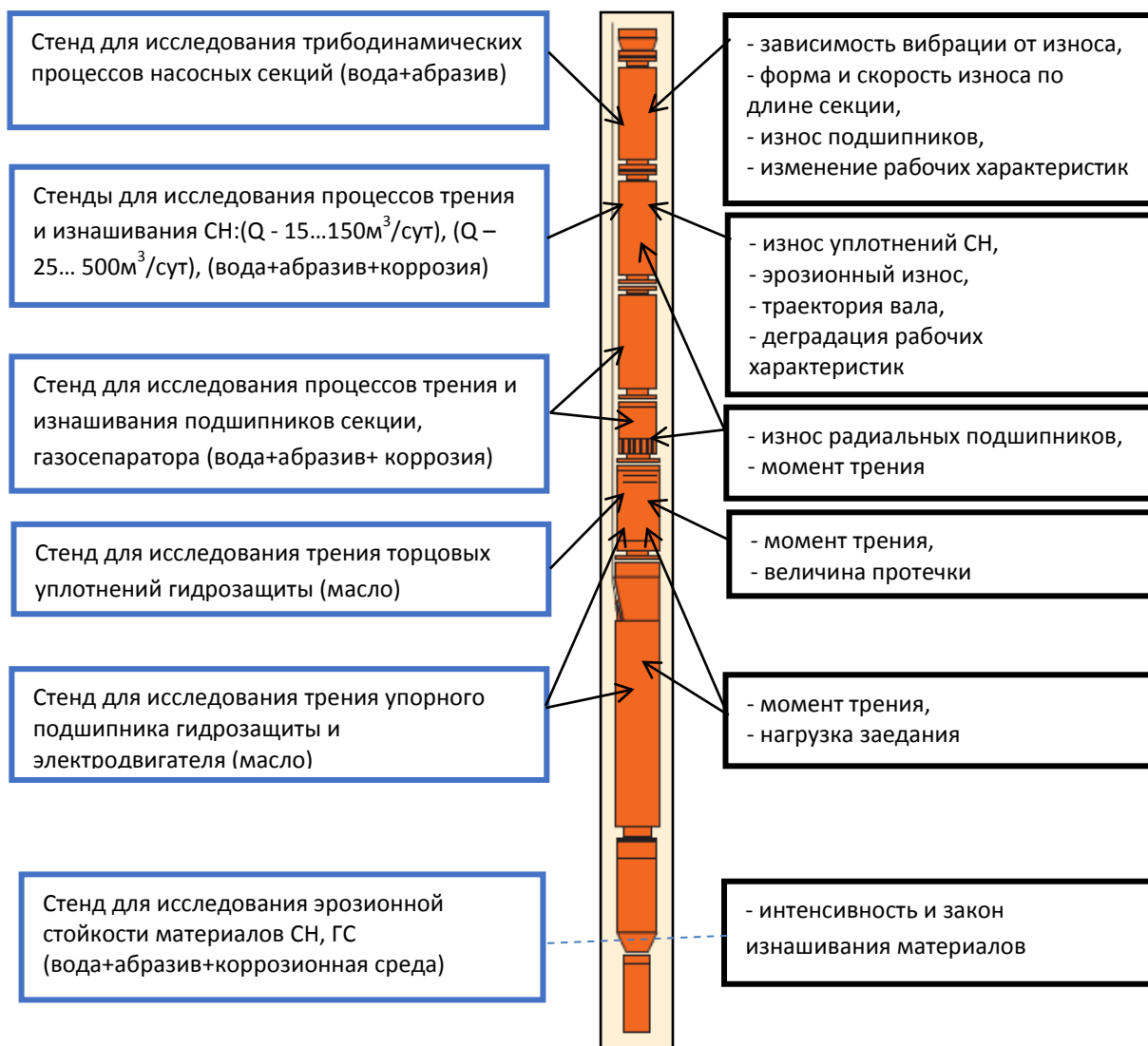


Рис. 1. Структура стендов для исследования трибодинамической системы ЭЛН

На стенде для исследования трибодинамических процессов насосных секций [2] получают закон распределения износа сопряжений по длине секции, зависимость виброскорости от износа сопряжений СН, определяют форму вращения вала (синхронная или асинхронная прецессия). Динамика ротора секции зависит от зазора в сопряжениях, вызванных износом. Показано, что при прочих равных условиях синхронная прецессия вала приводит к большей величине зазора и вибрации за одно и то же время, чем, например, асинхронная прецессия. Характер вращения вала влияет непосредственным образом на форму износа радиальных сопряжений.

Износостойкость насосной секции определяется преимущественно износостойкостью СН и промежуточных подшипников и характеризуется скоростью изнашивания, средней величиной которой $\bar{V}_{нс}$ можно представить в виде мультипликативной зависимости от скорости изнашивания ступеней $V_{стi}$, конструктивно-технологических факторов секции $k_{кт}$, коэффициента изменения свойств абразива k_a , динамического фактора $k_{дин}$:

$$\bar{V}_{нс} = A \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n V_{стi} \cdot k_{мп} \cdot k_a \cdot k_{дин},$$

где A – коэффициент, N – количество ступеней в секции.

Коэффициент $k_{кт}$ учитывает расстановку промежуточных подшипников по длине секции, k_a – изменение свойств абразива вследствие дробления. Динамический фактор $k_{дин} = f(h)$ учитывает соотношение собственной частоты колебаний ротора и частоты вращения вала, а также форму изгиба вала, а следовательно износ h . Эта зависимость имеет вид

$$h(x) = a + \sum_m^n \left(a_m \cos \frac{\pi m l}{L} + a_m \sin \frac{\pi m l}{L} \right),$$

где n – порядковый номер ступени; l – высота ступени; L – длина полуволны основной гармоничности колебаний или расстояние между подшипниками, $x = \pi n l$.

Коэффициенты получают расчетно-экспериментальным путем с использованием стенда для испытаний секций.

Износостойкость ступени оценивается скоростью изнашивания радиальных сопряжений, скоростью изнашивания осевых сопряжений и скоростью изнашивания проточной части. Для корректного проведения опытов по износу трибосопряжений ступеней необходимо обеспечить на стенде определенную форму вращения вала, соответствующую синхронной или асинхронной

прецессии, имеющих место в реальных механизмах. Это достигается оригинальным способом путем изменения жесткости вала, рис. 2.

Рабочее колесо (РК) 2, установленное в направляющем аппарате (НА) 3, закрепляется на валу 1, жесткость которого задается условиями опыта. При вращении возникает прецессия с переменным зазором h_{max} и h_{min} в радиальных сопряжениях. Таким образом достигается необходимая форма износа радиальных сопряжений на стенде исследования процессов трения и изнашивания ступени.

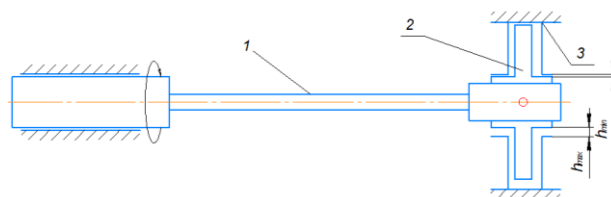


Рис. 2. Принципиальная схема испытательного узла стенда

В испытательном узле стенда используется сборка НА 1, РК 2, НА 1, рис. 3. Предусмотрены два режима испытаний: со свободным валом или с концевым подшипником 3. В первом случае моделируется насосная секция без промежуточных подшипников, во втором случае – с промежуточными подшипниками. Второй случай используют также для исследования осевых сопряжений и измерения осевой силы ступени.

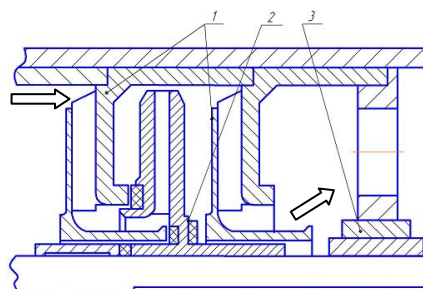


Рис. 3. Схема испытаний ступени и подшипника

Исследование процесса гидроабразивного (эрозионного) изнашивания проточной части ступени производится при увеличенной частоте вращения и концентрации абразива.

Подшипники скольжения, устанавливаемые на валу через определенные промежутки, функционируют в тех же условиях, что и ступени. Поэтому для исследования трибологических характеристик подшипников применяется тот же стенд, в котором ступени используются для обеспечения движения модельной жидкости с заданным расходом.

Упорный гидродинамический подшипник функционирует в замкнутом объеме, в условиях масляной среды. Высокие нагрузки и температура среды, а также динамические возмущения на пяту от вала – особенности его работы. Методология разработки концепции конструкции заключалась в обеспечении необходимых условий функционирования, нагружения и регистрации переходных процессов трения. В качестве критерия работоспособности использовали предельные величины нагрузки и температуры, а также динамику изменения момента сопротивления при изменении нагрузки.

Для расширения функциональных характеристик в стенде используются две системы нагружения: воздушная и гидравлическая, также два привода с одним электродвигателем: с частотой до 4000 об/мин и с мультипликатором – до 10000 об/мин. Это обеспечивает возможность получения высоких нагрузок и частоты вращения в одном устройстве. В качестве опорных используются «жертвенные» шариковые подшипники.

Процессы гидроабразивного (эрозионного) изнашивания исследуются по двум методикам, составляющим единство подхода. На стенде ступени исследуются особенности возникновения «промыва» и кинетика его развития на реальном объекте.

Гидроабразивная (эрозионная) стойкость материалов ступеней исследуется на разработанном стенде. Принцип действия стенда согласуется с принципом действия ступени центробежного типа, рис. 4, что обеспечивает подобие процесса моделирования и реального процесса изнашивания.

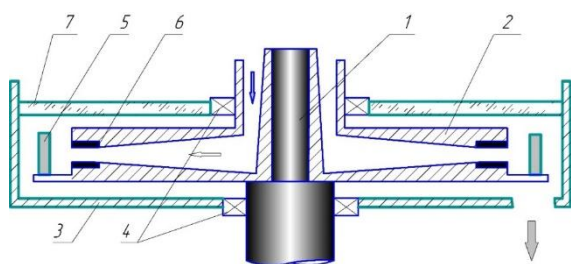


Рис. 4. Схема испытательного узла стенда

Его суть заключается в том, что модельная жидкость поступает в центральное отверстие вращающегося ротора 2 с двумя или четырьмя радиальными каналами и износостойкими соплами 6, из которых модельная жидкость под действием центробежной силы истекает на образцы 5, установленные напротив отверстий и вращающиеся вместе с диском.

Испытуемые образцы 5 устанавливаются на определенном расстоянии от сопла под определенным углом к струе жидкости и закрепляются. Камера 3 закрывается прозрачной крышкой 7. Уплотнения 4 предотвращают протекание жидкости в местах контакта с вращающимся ротором.

Использованная жидкость сливается в гравитационный сепаратор, где происходит разделение жидкости и абразива, после чего жидкость с новым абразивом поступает в камеру.

Величина скорости потока задается частотой вращения ротора и определяется косвенным образом путем измерения расхода.

Мерой износостойкости материала служит интенсивность изнашивания I_3 , равная отношению изменения массы образца к количеству абразива в опыте.

Заключение

1. На основе анализа трибодинамических процессов ЭЛН разработан комплекс стендов для исследования трибологических процессов в основных элементах механической системы.

2. Трибологические исследования учитывают изменение динамики ЭЛН, что выражается в оригинальной конструкции испытательного узла, обеспечивающего прецессию вала.

[1] Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В.Фролова, Е.А.Марченко. – М.: Машиностроение, 2008. – 384 с.

[2] Смирнов Н.И., Григорян Е.Е. Исследование влияния износа подвижных сопряжений на отказ погружных электроприводных лопастных насосов для добычи нефти // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – №1. – С. 102-107.

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ТРЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Столяров В.В.

E-mail: vlstol@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Представлен краткий обзор структурных факторов, влияющих на трение материалов – чистых металлов и сплавов. Особое внимание сфокусировано на роли масштабного фактора структуры – размера зерен в широком диапазоне. Рассмотрены УМЗ материалы, полученные методом интенсивной пластической деформации. Предполагается, что устойчивая корреляция между прочностью, твердостью и износом может нарушаться под влиянием других важных факторов поверхности – шероховатости, смазки, температуры и др.

Ключевые слова: микроструктура, фазовый состав, размер зерен, трение, износ.

Введение

Процесс трения скольжения на микроконтактах в условиях напряжений, близких к напряжению течения, повышенной температуры и интенсивной пластической деформации поверхностного слоя может сопровождаться структурными изменениями, которые в свою очередь приводят к деградации механических и физико-химических свойств приповерхностных слоев. К таким структурным изменениям относят образование дислокационных субструктур, полигонизацию, двойникование, динамическую рекристаллизацию, фрагментацию, измельчение. Предполагается, что подобные изменения при длительном воздействии практически не зависят от исходного состояния и определяются только внешними параметрами процесса [1]. Тем не менее, трение материалов с малым размером зерен представляет важный пример возможного практического применения [2]. В случае особых условий трения (фреттинг) интенсивность структурной эволюции может способствовать даже аморфизации поверхности [3]. Ниже рассмотрены примеры трения объемных ультрамелкозернистых металлов и сплавов, включая наноструктурные.

Сплав с памятью формы $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$

На рис. 1 представлена зависимость адгезионной составляющей коэффициента трения f_M , от температуры контакта Θ для сплава с различным размером зерен, полученного прокаткой с током и последующим отжигом. Видно, что с

MICROSTRUCTURE ASPECTS OF FRICTION IN METALS AND ALLOYS

Stolyarov V.V.

A brief review of the structural factors affecting the friction of materials-pure metals and alloys is presented. Special attention is focused on the role of the scale factor of the structure, i.e., the grain size in a wide range. It is assumed that stable correlation between strength, hardness and wear can be broken under influence of other important surface factors - roughness, lubrication, temperature, etc.

Keywords: microstructure, phase composition, grain size and grain boundaries, friction, wear.

уменьшением размера зерен до 30 нм и соответственно повышением прочности и твердости сплава f_M уменьшается и достигает минимального значения.

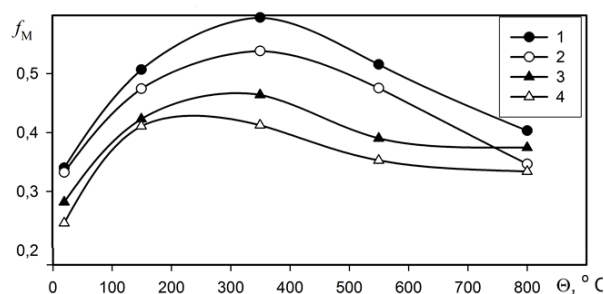


Рис. 1. Температурная зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения f_M , контактной пары – TiNi-BK8 при размере зерен: 1 - $d = 80$ мкм; 2 - $d = 250$ нм; 3 - $d = 100$ нм; 4 - $d = 30$ нм [4]

Кроме того, f_M для всех состояний с повышением температуры сначала возрастает, достигает максимума в интервале температур 250 ÷ 350 °C, а затем уменьшается. Подобный максимум наблюдали для этого же сплава, полученного методом равноканального углового прессования (РКУП) [4]. Авторы связывают появление максимума с двумя факторами, действующими с повышением температуры противоположным образом – обратным превращением мартенсита в аустенит и появлением признаков сверхпластичности. Установлено также (рис. 2), что УМЗ сплав $Ti_{49,8}Ni_{50,2}$ близкого химического состава, но в отличие от $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ являющийся мартенситным,

имеет повышенную износостойкость по сравнению со своим КЗ аналогом [5].

Титан

Результаты исследования трения и износа, выполненные на технически чистом титане разных марок и разными методами, оказались противоречивыми. Испытания по схеме «диск–палец» [5] подтвердили снижение средних значений коэффициента трения и износа у РКУП титана BT1-0 ($O_2 = 0,2\%$), по сравнению с КЗ состоянием (рис. 2).

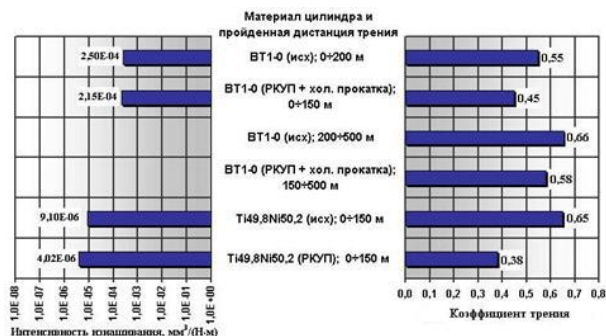


Рис. 2. Интенсивность изнашивания и коэффициент трения исследуемых материалов [5]

В работе [6] исследовали трибологические характеристики титана Grade 4 ($O_2 = 0,4\%$) с размером зерен d_3 40 и 0,4 мкм в условиях трения, приближающихся к фреттингу ($A / \delta \leq 1$), где δ и A размер радиус контакта и амплитуда смещения. Такой режим трения способствовал сохранению продуктов износа в зоне контакта. Результаты показали, что в этом случае коэффициент трения не зависел от размера зерен, а износ в ультрамелкозернистом (УМЗ) титане, несмотря на большую микротвердость, был вдвое выше, чем в крупнозернистом (КЗ) состоянии (табл. 1).

Табл. 1. Износ и $K_{тр}$ титана

d_3 , мкм	H_v , МПа	Зона контакта δ , мкм	Амплитуда A смещения, мкм	Износ, мкм	$K_{тр}$
40	2860	75	300	10	1,0
0,4	3320	70	300	20	1,0

Более высокий износ в УМЗ титане вероятно обусловлен большей плотностью границ зерен, которые, как известно, являются местом концентрации дефектов кристаллического строения (дислокаций, пор, примесей) и, соответственно, местом разрушения. Многократное пересечение индентором границ зерен приводит к их большому износу в УМЗ титане.

В целом качественных различий в рельефе поверхности (рис. 3) после износа КЗ и УМЗ Ti нет [7]. Первичным механизмом износа при трении

обоих структур является трибохимическая реакция, приводящая к окислительному износу. Наблюдение поперечных сечений образцов после износа скольжением подтвердило, что различаются три зоны на поверхности обеих структур (рис. 3): оксид титана; деформированная область, ориентированная вдоль направления скольжения и исходный материал.

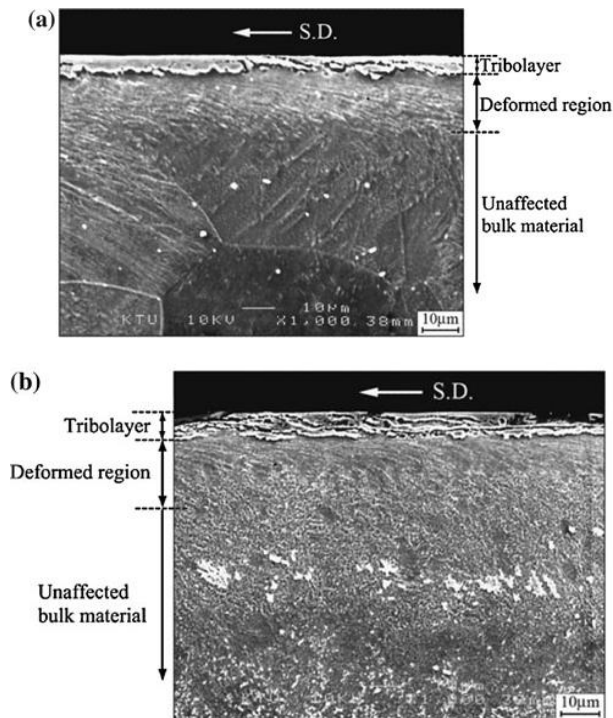


Рис. 3. Приповерхностные зоны КЗ (а) и УМЗ (б) титана [7]

Алюминий

Похожие результаты были представлены авторами работы [8] для технически чистого алюминия Al-1050 с размером зерен 44 мкм и 1,3 мкм, полученном методом РКУП. Хотя твердость образцов с мелким зерном была значительно выше твердости алюминия в исходном состоянии, они имели одинаковый коэффициент трения и более высокий износ (рис. 4).

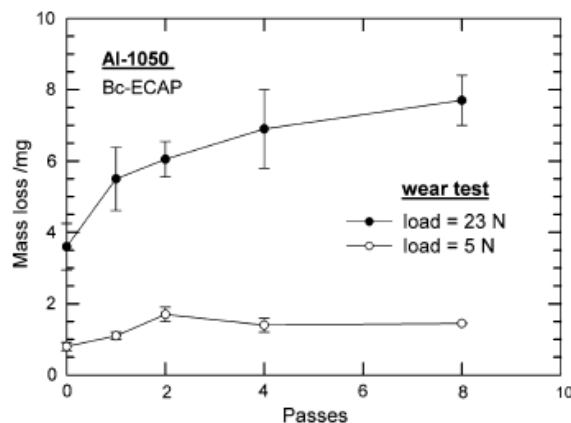


Рис.4. Зависимость износа от числа проходов РКУП [8]

Алюминиевый сплав

Рис. 5 показывает, что измельчение структуры путем увеличения количества проходов РКУП уменьшает износ Al и эвтектического сплава Al-12,6%Si, когда в их состав вводят добавки Al-5%Ti [9]. Это соответствует ранее обнаруженной тенденции уменьшения износа при уменьшении размера зерен и повышении твердости.

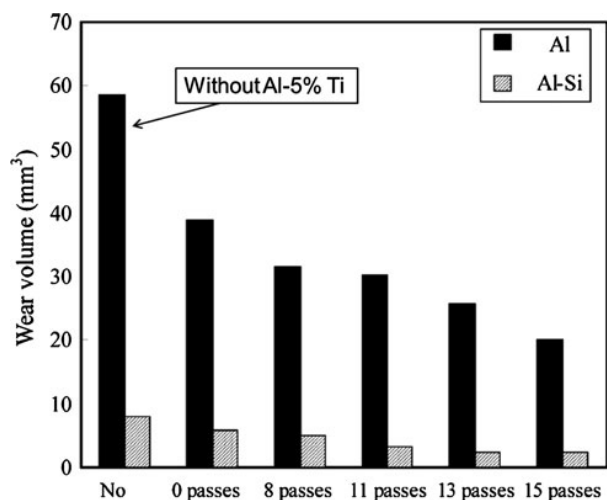


Рис. 5. Износ Al и сплава Al-12,6% Si после РКУП [9]

Заключение

В настоящее время существует ограниченное количество статей и результатов по трибологическому поведению материалов с УМЗ структурой. Анализ показывает, что эти данные представляют противоречивые тенденции. Большая часть работ исследует материалы, полученные методом РКУП. Результаты показывают, что ожидаемая устойчивая корреляция между прочностью, твердостью и износом не всегда реализуется, вследствие многих факторов, влияющих на износостойкость. На практике эти свойства материала, включая пластичность и

деформационное упрочнение, также являются важными факторами, влияющими на износостойкость. Другие факторы, такие как качество поверхности, смазка, нагрузка, скорость, коррозия, температура и свойства материала индентора также являются важными. Подводя итог, можно утверждать, что износ является сложным типом поведения системы и дальнейшие исследования должны прояснить истинную природу и механизмы износа УМЗ материалов.

- [1] Перспективные материалы: учебное пособие / В.Н. Лясников и др.; Под ред. Д.Л. Мерсона. – Тольятти: ТГУ, 2013. – Т. 5. – 422 с.
- [2] Gao N., Wang C.T., Wood R. J. K., Langdon T.G. Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation // J. Mater. Sci. – 2012. – Т.47. – С. 4779–4797.
- [3] Актуальные проблемы прочности / Столяров В.В., Кузнецов В.П., Феноменология и структурные аспекты фреттинг-трения конструкционных материалов, гл.2 в коллективной монографии, под ред. В.В. Рубаника. – Молодечно: ОАО «Типография «Победа», 2020. – 453 с.
- [4] Misochenko A.A., Chertovskikh S.V., Shuster L.S., Stolyarov V.V. Influence of grain size and contact temperature on the tribological behaviour of shape memory $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ alloy // Tribology Letters. – 2017. – Т. 65. – №. 4. – С. 1-7.
- [5] Чертовских С.В., Шустер Л.Ш. Анализ трения и изнашивания ультрамелкозернистых материалов с позиции термодинамики // Вестник УГАТУ. – 2016. – Т.20. – №2 (72) – С. 55-60.
- [6] Pakhomov M.A., Gorlov D., Stolyarov V. Features of wear and friction in titanium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 996. – №. 1. – С. 012017.
- [7] Purcek G. et al. Mechanical and wear properties of ultrafine-grained pure Ti produced by multi-pass equal-channel angular extrusion // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Т. 517. – №. 1-2. – С. 97-104.
- [8] Wang C. T. et al. Wear behavior of an aluminum alloy processed by equal-channel angular pressing // Journal of Materials Science. – 2011. – Т. 46. – №. 1. – С. 123-130.
- [9] Zhang Z. et al. Grain refining performance for Al and Al-Si alloy casts by addition of equal-channel angular pressed Al-5 mass% Ti alloy // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Т. 425. – №. 1-2. – С. 55-63.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЗАГУЩЕННЫХ СУЛЬФОНАТОМ КАЛЬЦИЯ ССК-400

¹Стрельникова С.С. *, ¹Самусенко В.Д., ²Татур И.Р., ²Кальянова О.А., ¹Щербаков Ю.И.

*E-mail: sofya.s.strelnikova@yandex.ru

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

²Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия.

Рассмотрено три образца смазочного материала, которые были приготовлены на различных дисперсионных средах с использованием сверхщелочного сульфоната кальция. Представлено сравнение их физико-химических свойств. Приведены результаты оценки температурной стойкости рассматриваемых смазок при трении. Испытанные сульфонатные смазки показали аналогичный характер изменения коэффициента трения от температуры, однако было выявлено влияние дисперсионной среды на значения контрольных показателей трения.

Ключевые слова: смазка, сульфонат кальция, дисперсионная среда, трибологические испытания, коэффициент трения, износ.

Введение

Для обеспечения работоспособности узлов трения, в которых по тем или иным причинам сложно обеспечить герметичность или необходимо уменьшить расход смазочного материала вплоть до одноразовой его закладки, уместно использование пластичных смазочных материалов. Сульфонат кальциевые смазки, обладающие повышенной механической стабильностью, вызывают особый интерес, в связи с возможностью их применения в тяжело нагруженных и высокотемпературных узлах трения, а также условиях действия ударных нагрузок [1]. Кроме того, такие смазки являются хорошими ингибиторами коррозии, а также отличаются повышенной стабильностью к действию воды [2-3]. Эти свойства позволяют применять их без ввода дополнительных присадок, повышающих токсичность, что способствует использованию рассматриваемого смазочного материала во многих отраслях промышленности [4]. Однако, на характеристики пластичной смази также влияет задействованная при производстве дисперсионная среда. Отсюда вытекает цель представленной работы – оценить влияние различных дисперсионных сред на антифрикционные и

THE EFFECT OF THE DISPERSION MEDIUM ON THE PROPERTIES OF PLASTIC LUBRICANTS THICKENED WITH CALCIUM SULFONATE SSK-400

Strelnikova S.S., Samusenko V.D., Tatur I.R., Kal'yanova O.A., Shcherbakov Y.I.

Three samples of lubricant were examined, which were prepared on various dispersion media using ultra-alkaline calcium sulfonate. A comparison of their physicochemical properties is presented. The results of the evaluation of the temperature resistance of the lubricants under friction are presented. The tested sulfonate greases showed a similar character of the change in the coefficient of friction from temperature, however, the influence of the dispersion medium on the values of the friction control indicators was revealed.

Keywords: grease, calcium sulfonate, dispersion medium, tribological tests, friction coefficient, wear.

противоизносные свойства пластичных смазок, приготовленных на основе высокощелочного сульфоната кальция ССК-400.

Материалы и методы

Загущающая способность сульфонатной базы напрямую зависит от щелочного числа, поэтому использование сверхщелочных сульфонатов кальция может снизить содержание загустителя в получаемой смазке [5], что уменьшает стоимость, при этом сохраняя её свойства. В связи с этим, в роли дисперсной фазы был взят высокощелочной синтетический сульфонат кальция (табл. 1), произведенный на основе алкилбензол-сульфокислоты в нефтяном масле – ССК-400 (ТУ ВУ 390401182.022-2011).

Табл. 1. Физико-химические показатели ССК-400

Наименование показателя	Фактическое значение
Щелочное число, мг КОН/г	405
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	200
Содержание сульфоната кальция, % масс.	28
Содержание кальция не менее, % масс.	13,5
Сульфатная зольность не более, % масс.	52,7

Для исследования влияния дисперсионной среды было использовано три базовых масла (табл. 2): масло изопарафиновое VHVI-4 (ТУ 38.401-58-415-2014); универсальное индустриальное масло АУ (ТУ 38.1011232-89) и компрессорное масло КС-19 (ГОСТ 9243-75).

Табл. 2. Физико-химические свойства дисперсионных сред

Наименование показателя	VHVI-4	АУ	КС-19
Плотность при 20 °С, кг/м ³	826	890	899
Вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с	4,4	3,4	20,2
Температура вспышки в открытом тигле, °С	224	180	268
Температура застывания, °С	-23	-48	-16

Исследуемые пластичные смазки приготовлены по технологии, разработанной на кафедре Химии и технологии смазочных материалов и химмотологии РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина [6]. Соотношение компонентов было следующим: 67,11 % сульфоната, 14,59% масла, 8,73% уксусная кислота, 9,57% дистиллированная вода (приведены % масс.). Физико-химические характеристики полученных сульфонатных смазок представлены в табл. 3.

Табл. 3. Физико-химические характеристики сульфонатных смазок на основе загустителя ССК-400 с различными дисперсионными средами

Наименование показателя	VHVI-4	АУ	КС-19
Температура каплепадения, °С (ГОСТ 6793-74)	>250	>250	>250
Коллоидная стабильность, % масс (ГОСТ 7142-74)	0,29	0,52	0,39
Предел прочности при 20°С, Па (ГОСТ 7143-73, метод Б)	870	>2000	>2000
Критическая нагрузка, Н ГОСТ 9490-75	1098	1303	1166
Нагрузка сваривания, Н ГОСТ 9490-75	6546	3920	3479

Для исследования приготовленных образцов использовался метод оценки температурной стойкости при трении по ГОСТ 23.221-84 на четырехшариковой машине КТ-2 [7]. Испытания проводили в диапазоне температур 30–300 °С. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью ~4 °С в минуту. Коэффициент трения оценивался в течение 60 с через каждые 10 °С. В узле трения использовались стандартные подшипниковые шарики из стали 100Cr6 (аналог отечественной стали ШХ15) диаметром 7,94 мм. Осевая нагрузка на узел трения составляла 108,4 Н (контактная нагрузка на один шар была равна 44,2 Н). Регистрировались следующие параметры: температура смазочного материала и значение

момента трения, на основе которого определялся коэффициент трения. Проводилось по три повторных испытания с каждым смазочным материалом, по средним значениям которых, строились зависимости коэффициента трения от температуры (рис. 1).

Результаты и обсуждение

Данные представленные в табл. 3 демонстрируют, что сульфонатная смазка, приготовленная с использованием масла VHVI-4, по сравнению с другими образцами имеет более низкие значения предела прочности и критической нагрузки, при этом нагрузка сваривания выше.

Из результатов трибологических испытаний, отраженных на рис. 1 видно, что все три исследуемых образца имеют схожую динамику изменения коэффициента трения от температуры. Для образцов на маслах VHVI-4 и АУ четко видны переходные температуры (табл. 4), где $T_{кр}$ – минимальная температура, при которой происходит разрушение смазочного слоя, T_m – температура, соответствующая максимальному коэффициенту трения, $T_{хм}$ – минимальная температура, при которой происходит образование на поверхностях трения модифицированного слоя, обладающего пониженным сопротивлением сдвигу. Кривая соответствующая маслу КС-19 (рис. 1) не проявляет столь выраженных температур.

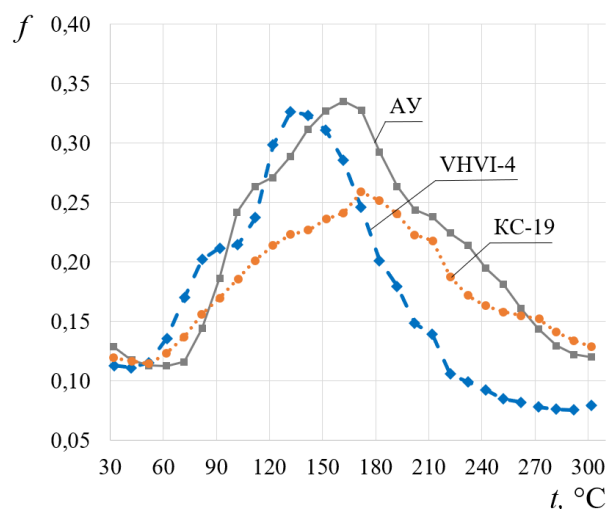


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от температуры при испытании сульфонатных смазок

Табл. 4. Переходные температуры (в соответствии с рис. 1)

Переходные температуры	VHVI-4	АУ	КС-19
$T_{кр}$, °С	50	70	50
T_m , °С	130	160	170
$T_{хм}$, °С	220	280	240

На рис. 2 представлено сопоставление размеров пятен износа после испытания до температуры 300 °С, а на рис. 3 показаны их фотографии.

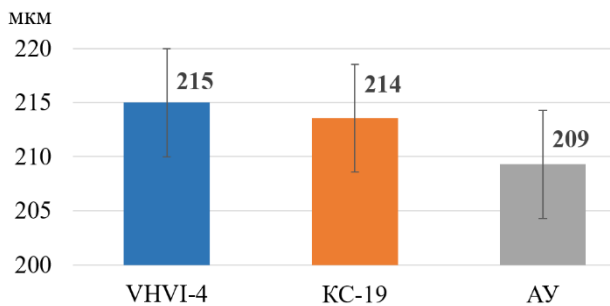


Рис. 2. Средний диаметр пятен износа после испытания сульфонатных смазок

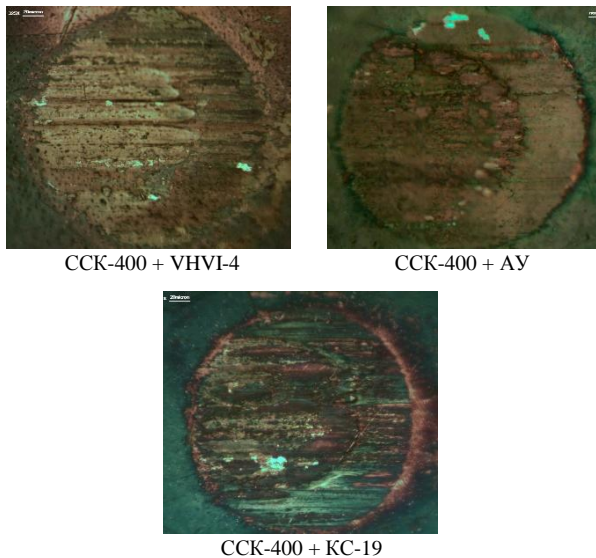


Рис. 3. Фотографии пятен износа после испытания сульфонатных смазок

Заключение

Испытанные сульфонатные смазки показали аналогичный характер изменения коэффициента трения от температуры, что связано с идентичным механизмом действия сульфонатного загустителя. Однако, дисперсионная среда влияет на значения контрольных показателей. Так мы видим относительное понижение максимального коэффициента трения при испытании образца, приготовленного на масле KC-19.

При испытании образца на масле VHVI-4 процесс образования модифицированного слоя содержащего карбонат кальция более выражен, вероятно за счёт меньшего содержания в масле полученном путем гидрокрекинга разного рода примесей, которые могут выступать в качестве поверхностно активных веществ затрудняющих взаимодействие сульфоната кальция с поверхностями трения.

Влияние дисперсионной среды на износ трущихся тел при данных условиях испытаний не выявлено, разница в диаметрах пятен износа в диапазоне допустимой погрешности.

Испытания проводились на оборудовании Центра коллективного пользования Института машиноведения им. А.А. Благодрава РАН.

- [1] Жорник В.И., Ивахник А.В., Запольский А.В., Ивахник В.П., Бухтилова М.А. Комплексная сульфонат кальциевая дисперсная фаза-основа инновационных смазочных наноматериалов //Актуальные вопросы машиноведения. – 2017. – Т.6. – С.346-350.
- [2] Bosman R., Lugt P.M. The microstructure of calcium sulfonate complex lubricating grease and its change in the presence of water // Tribology transactions. – 2018. – Т. 61. – № 5. – С. 842.
- [3] Zhou Y., Bosman R., Lugt P.M. On the shear stability of dry and water-contaminated calcium sulfonate complex lubricating greases // Tribology transactions. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 626.
- [4] Самусенко В.Д., Стрельникова С.С., Песковец А.В., Буяновский И.А., Татур И.Р., Кальянова О.А. Температурная стойкость пластичных смазочных материалов, загущенных сульфонатами кальция // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 5. – С. 105-112.
- [5] Кияжкова А.Ю., Викулова А.А., Попов П.С. Влияние дисперсионной среды и загустителя на трибологические характеристики сульфонатных пластичных смазок //Труды Российского государственного университета нефти и газа имени ИМ Губкина. – 2015. – № 2. – С. 73-80.
- [6] Анисимова А.А. Исследование влияния добавок на свойства сульфонатных пластичных смазок: дис. кандидата технических наук – М.: РГУ нефти и газа им. ИМ Губкина, – 2018. – 170 с.
- [7] Буяновский И.А., Лашки В.Л., Самусенко В.Д. Развитие температурного метода оценки смазочной способности масел // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2017. – № 2. – С. 28-33.

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ПРОЦЕСС ОСАДКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

¹Тохметова А.Б. *, ¹Албагачиев А.Ю., ²Скрипник С.В.

*E-mail: aygerim.tokhmetova@mail.ru

¹Институт машиноведения А. А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия;

²МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия.

Представлены экспериментальные исследования процесса осадки цилиндрической заготовки со смазочными композициями, содержащими углеродные наноматериалы. Проведенные испытания позволили определить влияние углеродных наноматериалов на коэффициент трения.

Ключевые слова: фуллерен, смазочная композиция, углеродные нанотрубки, моторное масло, базовое масло, усилие, коэффициент трения.

Введение

Осадка является кузнечной операцией, в результате которой увеличивается площадь поперечного сечения всей или части заготовки за счет уменьшения ее высоты [1-2]. На рис. 1 показана схема осадки заготовки между инструментом.

Для уменьшения влияния сил трения на результаты испытаний вводятся различные смазочные материалы между торцевыми поверхностями образца и опорными плитами. Во время процесса осадки используются различные виды смазочного материала (СМ): масляной СМ, масляной СМ с графитом, вода с графитом, стекло, солевой раствор и др. Данное исследование направлено на изучение того, как применение смазочного материала с наноматериалами влияет на коэффициент трения в системе заготовка – инструмент.

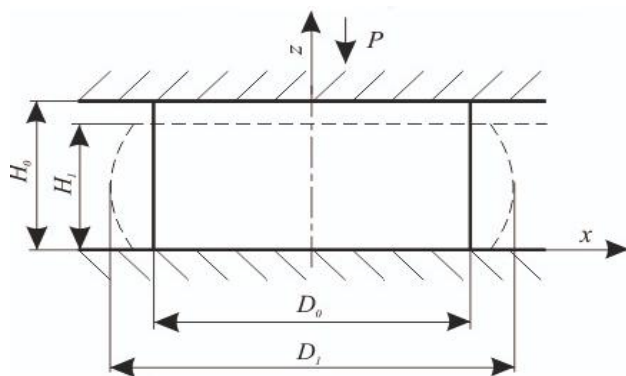


Рис. 1. Схема осадки: H_0 , D_0 - начальные размеры заготовки, H_1 , D_1 - размеры заготовки после осадки

EFFECT OF CARBON NANOMATERIAL LUBRICATION ON THE PRECIPITATION PROCESS OF A CYLINDRICAL BLANK

Tokhmetova A.B., Albagachiev A.Yu., Skripnik S.V.

Experimental studies of the process of precipitation of a cylindrical blank with lubricating compositions containing carbon nanomaterials have been presented. The tests have shown the influence of carbon nanomaterials on the friction coefficient.

Keywords: fullerene, lubricating composition, carbon nanotubes, motor oil, base oil, force, coefficient of friction.

Цель исследования заключается в сравнительном анализе влияния углеродных наноматериалов в моторном масле на снижение коэффициента трения в процессе осадки заготовки. Однако полностью устранить силы трения и обеспечить в образце при испытании линейное напряженное состояние не представляется возможным, что является принципиальным недостатком испытаний на сжатие [3].

Материалы и методы

Для исследования использовалось полусинтетическое моторное масло с добавкой углеродных наноразмерных частиц.

В качестве наноматериалов были испытаны порошки фуллеренов (C_{60}) и углеродные нанотрубки (УНТ).

Фуллерен (рис. 2) [4] – это молекулярное соединение, представляющее собой замкнутую сферу, состоящую из шестидесяти атомов углерода, производства Merck KGaA (г. Дармштадт, Германия). Принято считать, что использование C_{60} в качестве добавок к смазочным материалам экономически выгодно лишь тогда, когда их концентрация в смазочной композиции не превышает 2 мас. %.

УНТ (рис. 3) [5-7] являются листом графена, толщиной в один атом, свернутый в трубу длиной более 5 мкм, производства Ocsial. Наружный диаметр одностенной УНТ составляет $1,6 \pm 0,4$ нм. Содержание УНТ в моторном масле не превышало 1 масс. %.



Рис. 2. Фуллерен C₆₀

Приготовление смазочной композиции осуществляли путем тщательного ультразвукового перемешивания при помощи ультразвукового диспергатора в лаборатории узлов трения для экстремальных условий ИМАШ РАН (рис. 4). Продолжительность одной ультразвуковой обработки, сопровождавшейся нагревом раствора до 60-70°C составляла 10 мин.

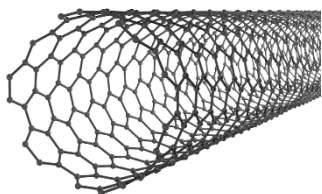


Рис.3. Одностенная УНТ

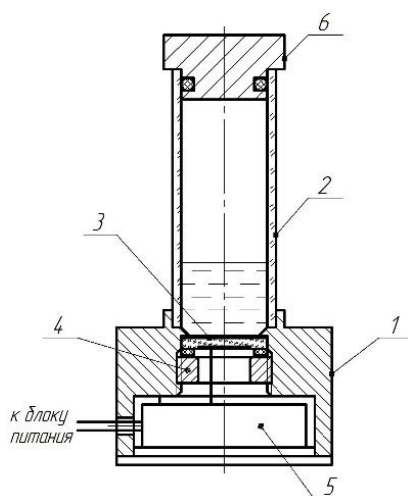


Рис. 4. Ультразвуковой диспергатор:

1 – основание, 2 – стеклянный цилиндр, 3 – пьезоэлемент,
4 – прижимная гайка, 5 – плата генератора, 6 – заглушка

Контроль качества перемешивания производился при помощи микроскопа Levenhuk zoom 1В (рис. 5), с плавно изменяемым увеличением в диапазоне от 7 до 45 крат.

Ультразвуковой диспергатор обеспечивает равномерное перемешивание моторного масла с C₆₀. При перемешивании УНТ с базовым маслом оставался осадок с примесями. Это связано с тем, что большая часть примесей находится в закапсулированном состоянии между молекулами УНТ, а некоторая – внутри их.



Рис. 5. Микроскоп Levenhuk zoom 1В

Эксперименты по осадке заготовки между опорными плитами проводились на цилиндрах (рис. 6) с размерами: $h_0 = 20$ мм, $d_0 = 20$ мм.

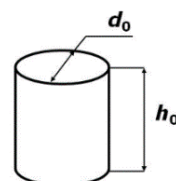


Рис. 6. Образец для испытаний

Исследование процесса осадки проводилось на автоматизированном лабораторном комплексе «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД – 1 ЧПУ (рис. 7). Измерение усилия проводилось по отсчетным устройствам пресса. Погрешность измерения усилия составило $\pm 2\%$. Смазка между торцевыми поверхностями образца и опорными плитами осуществлялась капельным способом.



Рис. 7. Автоматизированный лабораторный комплекс «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД – 1 ЧПУ

Результаты и обсуждение

При испытании установка автоматически показывает диаграмму процесса осадки – график зависимости между усилием и перемещением образца. При осадке получены образцы с большим поперечным размером при относительно малой высоте (~ 3-5 мм) (рис. 8).

Диаграммы процесса осадки цилиндра с различными смазочными материалами представлены на рис. 9-10.

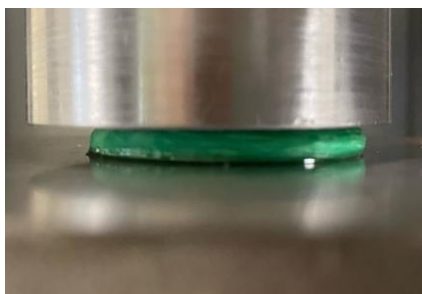


Рис. 8. Заготовка после процесса осадки

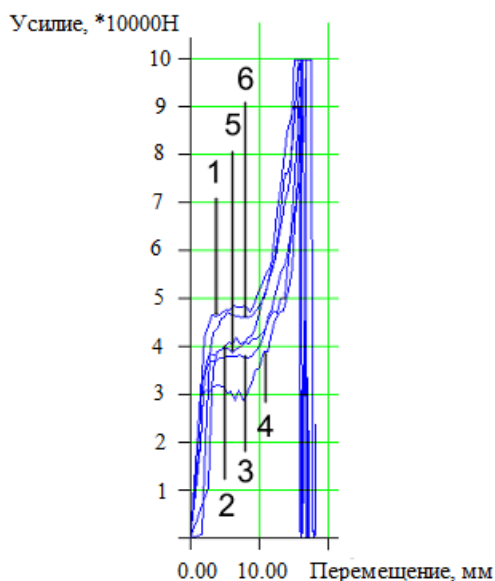


Рис. 9. Зависимость усилия от перемещения для испытанных смазочных материалов: 1 – без смазочного материала, 2 – моторное масло, 3 – моторное масло + 0,1 % фуллеренов, 4 – моторное масло + 0,2 % фуллеренов, 5 – моторное масло + 1 % фуллеренов, 6 – моторное масло + 2% фуллеренов

Соппротивление цилиндрической заготовки снижается в результате влияния смазки с углеродными наноматериалами на тангенциальное трение между заготовкой и инструментом.

Коэффициент трения f определялся по формуле [8]:

$$f = 6,25 \left(\frac{1-\delta}{1+\varepsilon} \right) \left(\frac{d_0}{h_0} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где ε – степень деформации.

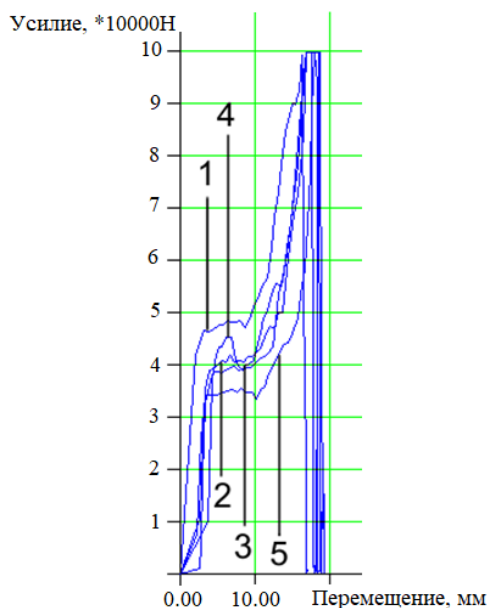


Рис. 10. Зависимость усилия от перемещения для испытанных смазочных материалов: 1 – без смазочного материала, 2 – моторное масло, 3 – моторное масло + 0,1 % УНТ, 4 – моторное масло + 0,2 % УНТ, 5 – моторное масло + 1 % УНТ

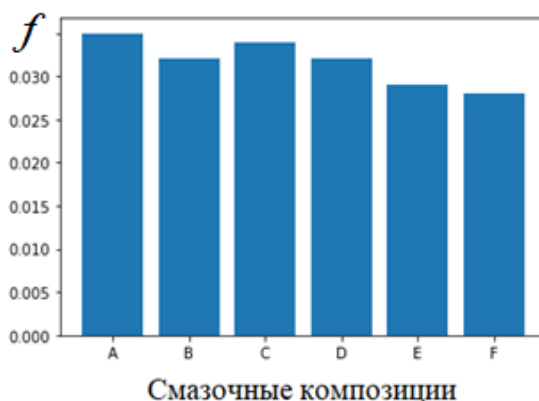


Рис. 11. Среднее значение расчетного коэффициента трения: А – без смазочного материала, В – моторное масло, С – моторное масло + 0,1 % фуллеренов, D – моторное масло + 0,2 % фуллеренов, E – моторное масло + 1 % фуллеренов, F – моторное масло + 2% фуллеренов

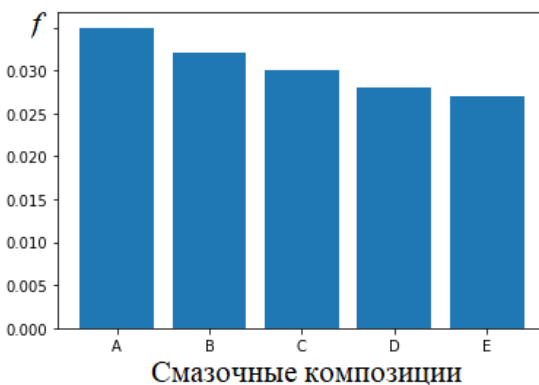


Рис. 12. Среднее значение расчетного коэффициента трения: А – без смазочного материала, В – моторное масло, С – моторное масло + 0,1 % УНТ, D – моторное масло + 0,2 % УНТ, E – моторное масло + 1 % УНТ

В результате проведённых испытаний было выявлено, что в одинаковых условиях процесса осадки добавка C_{60} и УНТ снижает коэффициент трения, что отражено на представленных диаграммах (рис. 11-12).

Заключение

Таким образом, из анализа экспериментальных данных с автоматизированного комплекса «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД – 1 ЧПУ следует, что моторное масло с введением углеродных наноматериалов снижает сопротивление деформированию заготовки и коэффициент трения. Снижение коэффициента трения при испытании моторного масла с содержанием 2 % фуллеренов составило ~ 17 %, а с содержанием 1 % УНТ ~ 18 %.

- [1] Подскребко М.Д. Сопротивление материалов. – Минск: Высшая школа, 2007. – 797 с.
- [2] Воронцов А. Л. Свободная осадка полых цилиндрических заготовок //Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2006. – №. 11. – С. 21-31.
- [3] Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
- [4] Туктаров А.Р., Хузин А.А., Джемилев У.М. Фуллеренсодержащие смазочные материалы: достижения и перспективы (Обзор) //Нефтехимия. – 2020. – Т. 60. – №. 1. – С. 125-147.
- [5] Руденков А.С., Ярмоленко М.А. Углеродные нанотрубки: классификация, особенности синтеза, методы исследования, области применения // Проблемы физики, математики и техники. - 2019. - № 2 (39). - С. 7-14.
- [6] Гвоздев А.А. и др. Исследование триботехнических характеристик перспективных смазочных материалов с углеродными наночастицами //Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2018. – Т. 18. – №. 1. – С. 66-72.
- [7] Zhang Z. et al. Effect of carbon nanotubes on friction and wear of a piston ring and cylinder liner system under dry and lubricated conditions //Friction. – 2017. – Т. 5. – №. 2. – С. 147-154.
- [8] Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П. Грудев – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.

ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

Усов П.П.

E-mail: usovp@mail.ru

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Россия.

Рассматривается упругогидродинамическая задача для опорного подшипника скольжения с частичным углом охвата. Изложен метод совместного численного решения уравнений гидродинамики и уравнений теории упругости при высоких деформациях. Показано, что деформации способствуют повышению несущей способности подшипника и могут повысить ее в несколько раз при фиксированной минимальной толщине смазочного слоя. Приведено семейство кривых, позволяющее производить приближенные расчеты для подшипников с углом охвата $\frac{2\pi}{3}$.

Ключевые слова: опорный подшипник скольжения, деформации, толщина смазочного слоя, давление в слое смазки.

Введение

Подшипники скольжения жидкостного трения являются важными элементами многих современных машин и механизмов. Для расчета характеристик таких подшипников на стадии

DEMORMATION EFFECTS ON HEAVILY LOADED JOURNAL BEARING

Usov P.P.

The elastohydrodynamic problem of a sliding bearing with a partial angle of coverage is considered. A method for the joint numerical solution of the equations of hydrodynamics and the equations of the theory of elasticity at high deformations is described. It is shown that deformations contribute to an increase in the bearing capacity of the bearing and can increase it several times with a fixed minimum film thickness. A family of curves is given that allows making approximate calculations for bearings with a coverage angle $\frac{2\pi}{3}$.

Keywords: sliding bearing, deformations, film thickness, pressure in the lubricant layer.

проектирования широко применяется гидродинамическая теория смазки, в которой не учитываются упругие деформации элементов подшипника. Однако по мере повышения нагрузок деформации элементов и их влияние на

характеристики подшипника растут. При высоких нагрузках упругие перемещения поверхностей деформируемых тел могут существенно превышать минимальную толщину смазочного слоя и могут существенно повлиять на характеристики подшипника. Таким образом, задача решения уравнений гидродинамики совместно с уравнениями теории упругости для подшипников скольжения является актуальной. Особенно эта задача актуальна для крупногабаритных опор валков прокатных станков, работающих при высоких нагрузках.

Наиболее сложной задачей при расчете узлов жидкостного трения с учетом деформаций является совместное решение уравнений гидродинамики и уравнений теории упругости, определяющих деформации тел. Отдельное решение уравнений гидродинамики при известных деформациях не представляет больших трудностей для численных методов. Точно так же отдельное определение упругих перемещений поверхностей при заданных нагрузках на тела не представляет больших трудностей для численных методов. Поэтому основным методом решения упругогидродинамических (УГД) задач для подшипников скольжения является последовательное решение уравнений гидродинамики и уравнений теории упругости. Задается толщина смазочного слоя (или давление в смазочном слое), определяется давление в смазочном слое (или толщина смазочного слоя). И такие итерации повторяются. Такой подход используется в большинстве работ, например, в работах [1-4]. Однако такие итерации сходятся только при малых деформациях. При высоких деформациях, когда упругие перемещения поверхностей существенно превышают минимальную толщину смазочного слоя, итерации не сходятся. Об этом свидетельствуют и результаты расчетов, приведенные в работах [1, 2]. Результаты приведены при относительных эксцентриситетах, не превышающих значения 0,9. В действительности при высоких деформациях эксцентриситет может существенно превышать радиальный зазор.

В данной работе приведен новый метод решения УГД задачи для опорного подшипника скольжения с частичным углом охвата. Проведен анализ влияния деформаций на несущую способность при фиксированной минимальной толщине смазочного слоя. Показано, что деформации могут существенно повысить несущую способность подшипника. Приведены новые результаты относительно работы [5], в которой также исследовалось влияние деформаций на несущую способность подшипника.

Математическая модель подшипника

Рассмотрим модель подшипника в виде контакта упругого цилиндра и упругого пространства с цилиндрическим вырезом при наличии тонкого слоя смазочной жидкости. Давление в смазочном слое будем определять из уравнения Рейнольдса. Используя выражения для упругих перемещений поверхностей кругового кольца, приведенных в работе [6], систему уравнения для подшипника с частичным углом охвата в безразмерных переменных запишем в виде

$$H(\varphi) = 1 - \lambda \cos(\varphi - \varphi_s) - \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta}^{\varphi_c} q(\xi) \left[\cos(\varphi - \xi) \ln \left| \sin \frac{\varphi - \xi}{2} \right| - \frac{1}{4} \right] d\xi,$$

$$H^3 \exp(-Gq) \frac{dq}{d\varphi} = V(H - H_0), \quad H = \frac{h}{\Delta}, \quad q = \frac{P}{P_0},$$

$$P_0 = \frac{1}{8} \frac{\Delta}{R_2} \frac{E}{(1 - \nu^2)}, \quad G = \alpha_p P_0, \quad \int_{-\theta}^{\varphi_c} q \cos \varphi d\varphi = P,$$

$$\int_{-\theta}^{\varphi_c} q \sin \varphi d\varphi = 0, \quad q(\varphi_c) = 0, \quad dq(\varphi_c)/d\varphi = 0 \text{ если}$$

смазочный слой обрывается, не доходя до входной кромки выходного кармана, $\varphi_c = \theta$ в противном случае.

Здесь θ – половина угла охвата подшипника, φ_c – координата места обрыва смазочного слоя, $\Delta = R_2 - R_1$ – радиальный зазор, R_2 – радиус вала, R_1 – внутренний радиус втулки, λ – относительный эксцентриситет, $\lambda = \frac{d}{R_2}$, E, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона вала и втулки, h – толщина смазочного слоя, p – давление в смазочном слое, $V = \frac{6\mu_0 u R}{(\Delta^2 p_0)}$, $P = \frac{W}{(R p_0)}$, α_p – коэффициент зависимости вязкости от давления, $H_0 = H(\varphi_c)$. Приведенные уравнения и условия определяют параметры φ_s, φ_c и функции $H(\varphi), q(\varphi)$, если заданы параметры λ, V, P, G .

Метод численного решения задачи

На отрезке $[-\theta, \varphi_c]$ вводим неравномерную сетку $\{\varphi_k\}$, $k = 1, 2, \dots, N$, $\varphi_1 = -\theta$, $\varphi_N = \varphi_c$. Пусть $q_k = q(\varphi_k)$, $H_k = H(\varphi_k)$, $k = 1, 2, \dots, N$, $q_1 = q_N = 0$, $H_N = H_0$. При вычислении H_i при заданных значениях q_k функцию $q(\varphi)$ заменяем кусочно-линейной функцией. В результате получаем

$$H_i = 1 - \lambda \cos(\varphi_i - \varphi_s) - \frac{1}{2\pi} \sum_{k=2}^{N-1} q_k \left[I_{1,k}(\varphi_i) + I_{2,k}(\varphi_i) \right] \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, N$, коэффициенты $I_{1,k}(\varphi_i)$ и $I_{2,k}(\varphi_i)$ выражаются через интегралы

$$I_1(\varphi) = \sin \varphi \ln \left| \sin \frac{\varphi}{2} \right| - \frac{1}{2}(\varphi + \sin \varphi) \quad \text{и}$$

$$I_2(\varphi) = (\varphi \sin \varphi + \cos \varphi - 1) \ln \left| \sin(\varphi/2) \right| - 0,5 \left(\frac{\varphi^2}{2} + \varphi \sin \varphi + 2 \cos \varphi \right).$$

Уравнение Рейнольдса в узле φ_i заменим конечно-разностным уравнением в виде

$$\left(\frac{H_i + H_{i+1}}{2} \right)^3 \frac{\exp(-Gq_{i+1}) - \exp(-Gq_i)}{G(\varphi_{i+1} - \varphi_i)} = -V(H_i - H_0) \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, N - 1$.

Подставляя выражения (1) в уравнения (2), получаем систему $N - 1$ нелинейных алгебраических уравнений относительно $N + 1$ неизвестных: $q_2, q_3, \dots, q_{N-1}, \varphi_\delta, \varphi_c$. Недостающими уравнениями относительно приведенных неизвестных являются условия равновесия вала после замены в них интегралов конечными суммами.

Приведенная система нелинейных алгебраических уравнений решается итерациями, сходящимися до предельного значения относительного эксцентриситета, при котором наступает сухой контакт.

Результаты расчетов и их анализ

Ниже приведены результаты расчетов при значении параметра $\theta = \frac{\pi}{3}$. Такое значение половины угла охвата характерно для опор валков прокатных станов. На рис. 1 приведены зависимости коэффициента нагруженности $B = \frac{P}{V}$ от параметра V при различных значениях $H_{\min} = H(\varphi)$, $-\theta \leq \varphi \leq \varphi_c$. Отношение $\frac{P}{V}$ не зависит от упругих свойств вала и подшипника, а параметр V обратно пропорционален модулю упругости втулки, поэтому зависимость параметра B от параметра V характеризует влияние упругости втулки на несущую способность подшипника. При высоких значениях модуля упругости E , что соответствует жесткому вкладышу, значение параметра V мало. При малых значениях модуля упругости E , что соответствует высоким деформациям вкладыша, значение параметра V велико. Таким образом, характер изменения отношения B при росте параметра V дает представление о том, как влияет рост деформаций вкладыша на нагрузку.

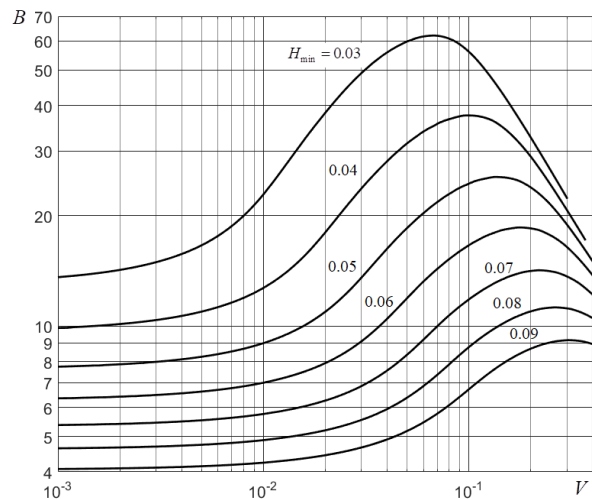


Рис. 1. Зависимость коэффициента нагруженности B от параметра V при различных значениях H_{\min}

Из приведенных результатов следует, что мере уменьшения модуля упругости, что соответствует росту упругих перемещений деформируемых поверхностей, несущая способность подшипника растет, достигает максимума, а затем падает. Анализ результатов расчета показал, что падение несущей способности наступает после того, как обрыв смазочного слоя начинает происходить на входной кромке выходного кармана. При максимальном влиянии упругих деформаций несущая способность подшипника может в несколько раз превышать теоретическую несущую способность при не учете деформаций. Это следует из результатов, приведенных на рис. 2, на котором приведена зависимость B_{\max} / B_{gd} от параметра H_{\min} . Здесь B_{\max} – максимальное значение несущей способности подшипника при минимальной безразмерной толщине смазочного слоя H_{\min} , B_{gd} – несущая способность подшипника в гидродинамическом режиме, т.е. без учета деформаций.

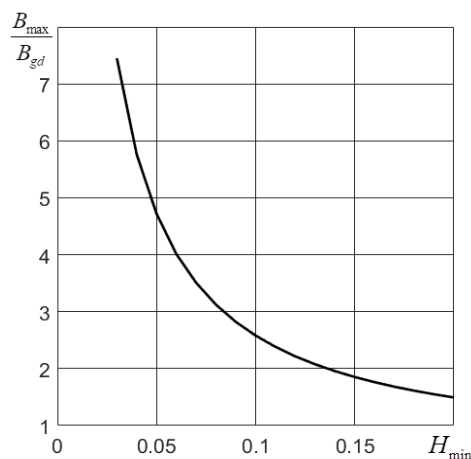


Рис. 2. Зависимость $\frac{B_{\max}}{B_{gd}}$ от параметра H_{\min}

На рис. 3 приведена зависимость относительного эксцентриситета λ_* , при котором несущая способность максимальна, от параметра H_{\min} . Из приведенных результатов следует, что максимальное влияние деформаций на несущую способность подшипника происходит при относительном эксцентриситете, превышающем единицу.

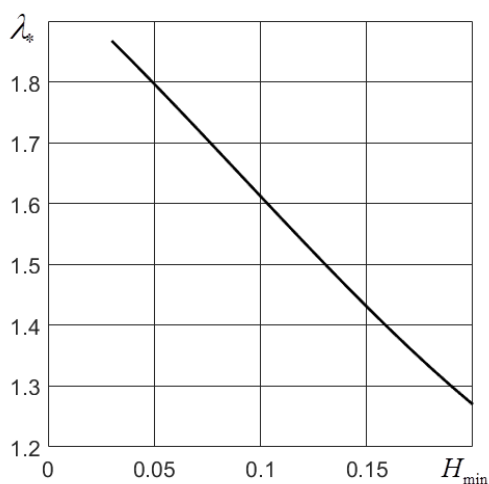


Рис. 3. Зависимость относительного эксцентриситета λ_* от параметра H_{\min}

В работе [7] учет деформаций производился приближенно. При этом упругие перемещения деформируемой поверхности принимались не зависящими от угла φ и равными максимальному значению упругих перемещений по области контакта. Фактически поверхности тел с учетом

деформаций оставались окружностями, а роль деформаций сводилась к изменению радиального зазора. В результате анализа полученных численных результатов был сделан вывод о том, что значение несущей способности подшипника с податливой опорной поверхностью меньше, чем у такого же подшипника с жесткой опорной поверхностью. Такой результат получился вследствие того, что не учитывалось отклонение формы зазора вследствие деформаций от формы зазора между эксцентрическими окружностями.

На рис. 4(а) приведены зависимости $h(\varphi)$, а на рис. 4(б) – зависимости $p(\varphi)$ для подшипника с параметрами $\theta = \frac{\pi}{3}$, $R_2 = 0,1375$ м, $E = 220$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\psi = 7,25 \cdot 10^{-4}$, $u = 1 \frac{м}{с}$, нагрузка $W = 1,77 \cdot 10^6 \frac{Н}{м}$, масло Т₂₂, $\mu_0 = 0,0192$ Па·с. Кривая 1 – расчеты по приведенной методике при значении $\alpha_p = 0$, 2 – при значении $\alpha_p = 10^{-8}$ Па⁻¹, 3 – при значении $\alpha_p = 2 \cdot 10^{-8}$ Па⁻¹, 4 – экспериментальные данные, приведенные в работе [8], 5 – результаты расчетов при не учете деформаций. С учетом деформаций относительный эксцентриситет получился равным $\lambda = 1,13$, без учета деформаций - $\lambda = 0,953$. Видно, что если не учитывать деформации, то теоретическая минимальная толщина смазочного слоя получается значительно ниже экспериментальной, а максимальное давление – значительно выше. С учетом деформаций теория и эксперимент по толщине смазочного слоя хорошо согласуются. По давлению экспериментальных данных не приведено.

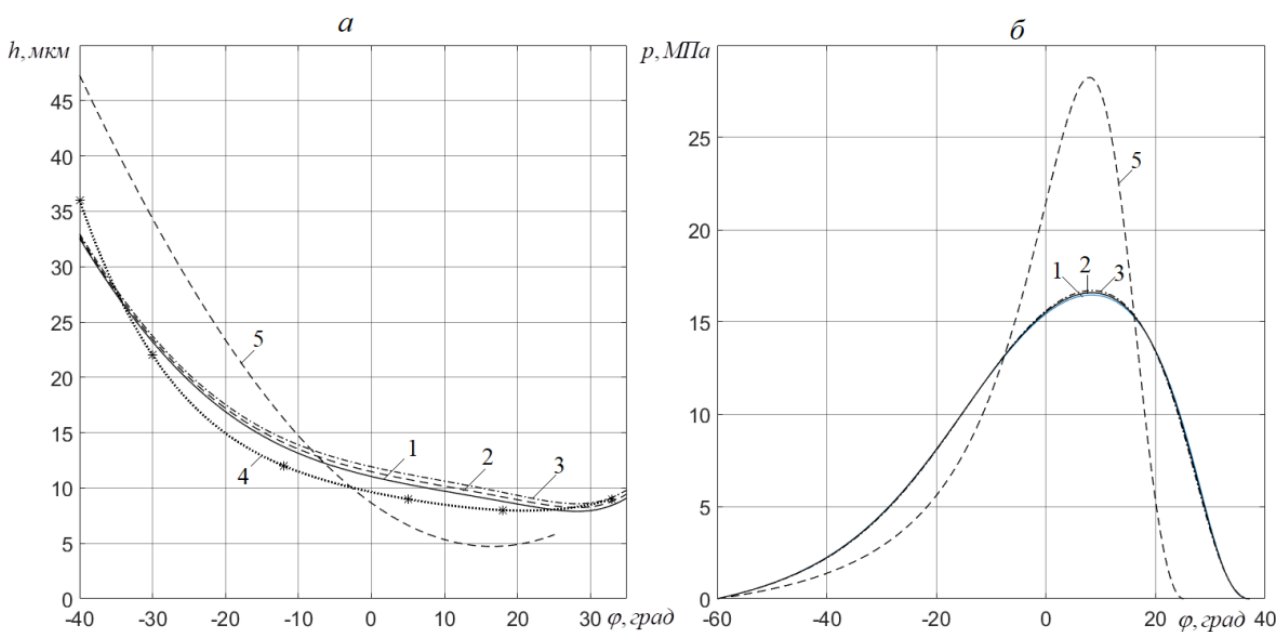


Рис. 4. Зависимости $h(\varphi)$ и $p(\varphi)$ для подшипника с приведенными выше параметрами

- [1] Fanning Meng, Yuanpei Chen. Analysis of elasto-hydrodynamic lubrication of journal bearing based on different numerical methods // *Industrial Lubrication and Tribology*. – 2015. – Т. 67. – № 5. – С. 486-497.
- [2] Maamar Malki et al. Elastic Deformation Effects on Self-Lubricating Journal Bearings using Pseudo-Plastic Lubricants // *Tribology Online*. – 2021. – Т.16. – №4. – С. 299-308.
- [3] Рождественский Ю.В., Хозенюк Н.А. Упругогидродинамическая задача смазки сложнагруженных опор скольжения // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2009. – Т.19. – №3. – С. 57-63.
- [4] Рыбкин Н.Н., Зернин М.В., Магюхин А.В. Конечно-элементное моделирование упругогидродинамики цилиндрических подшипников скольжения и накопления усталостных повреждений антифрикционного слоя //

- Трибология – машиностроению: Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции. – Москва, 2020. – С. 237-242.
- [5] Usov P.P. EHD Effects in Lubricated Journal Bearing // *Lubricants*. – 2018. – Т. 12. – №6. – С. 1-16.
- [6] Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения / Галахов М.А., Усов П.П. – М.: Гл. ред. физ.- мат. Лит., 1990. – 280 с.
- [7] Ахвердиев К.С., Колесников И.В., Мукутадзе М.А., Семенко И.С. Математическая модель вязкопластичной смазки подшипников скольжения с деформируемой опорной поверхностью // *Вестник ДГТУ*. – 2012. – Т.69. №8. – С. 18-22.
- [8] Крупногабаритные гидро-статодинамические подшипники / Тодер И.А., Тарабаев Г.И. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.

О ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ НАУЧНЫХ ГИПОТЕЗ СХВАТЫВАНИЯ

Федоров С.В.

E-mail: fedorov@klgtu.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия.

Энергетическая гипотеза схватывания, сформулировавшая энергетический порог схватывания, являясь центральной гипотезой органично дополняется другими гипотезами. Вместе все гипотезы схватывания позволяют глубже понять логику и практику процесса трения.

Ключевые слова: трение, схватывание, гипотезы, энергия, диаграмма эволюция контакта.

Введение

Изучение проблемы схватывания при трении породило долгую научную дискуссию. Были предложены разные научные гипотезы схватывания – дислокационная, вакансионная, диффузионно-вакансионная, рекристаллизационная, пленочная, электронная и др., среди которых центральное место занимала энергетическая гипотеза схватывания А.П. Семенова [1]. Со временем дискуссионность утратила свою остроту, однако объединительного взгляда на природу явления и процесса схватывания при трении так и не было достигнуто.

В тоже время все предложенные гипотезы схватывания обладают объективным смыслом и не противоречиво дополняют друг друга, будучи взаимно связанными единой логикой эволюции контакта трения.

ON THE MUTUAL CONNECTION OF SCIENTIFIC HYPOTHESES OF SEIZURE

Fedorov S.V.

The energy hypothesis of seizure in friction, which formulated the energy threshold of seizure, being the central hypothesis, is organically complemented by other hypotheses. Together, all the hypotheses of seizure allow a deeper understanding of the logic and practice of the friction process.

Keywords: friction, seizure, hypotheses, energy, contact evolution diagram.

Этапность процесса схватывания

Значительный интерес для анализа взаимосвязи и соподчинения друг другу различных гипотез схватывания представляет рассмотрение этапности схватывания в рамках структурно-энергетической диаграммы трущихся поверхностей «рис. 1» [2].

В наиболее общем случае, область процесса схватывания «рис. 1» обозначена точками 1,2,3. Точка 1 представляет точку предельного деформационного (дислокационного) упрочнения, реализуемого по механизмам образования, движения и взаимодействия дислокаций. Естественно, что область левее этой точки и вплоть до нее, когда процесс пластической деформации контролируется преимущественно сдвиговой моделью, можно рассматривать как область наиболее явного проявления *дислокационной модели схватывания*. Действительно, представить себе

образование *активного центра* на поверхности трения, являющегося элементарным очагом схватывания, наиболее рационально рассматривая акт выхода дислокации (сдвига) на поверхность.

Вполне закономерно обозначить точку 1 предельного деформационного упрочнения как стартовую точку схватывания для всей области процесса схватывания 1-2-3. Соответственно область левее окрестности точки 1 и саму точку 1 возможно обозначить как первый этап схватывания «рис. 2».



Рис. 1. Структурно-энергетическая диаграмма эволюции трущихся поверхностей (контакта трения) [2]. Обозначение на осях: N, v — нагрузка и скорость; $\mu_{ст}, \mu_{дин}, \mu_{упр}, \mu_{пл}$ — статический, динамический, упругий, пластический коэффициенты трения; T_f, T_s — температура вспышки в контактом объеме трения в точке 3 и температура плавления

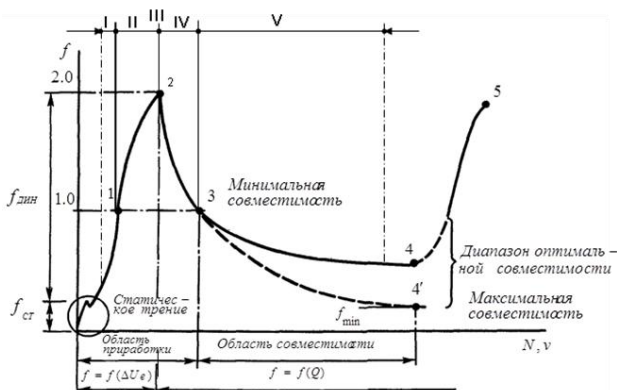


Рис. 2. Этапы процесса схватывания в рамках структурно-энергетической диаграммы эволюции трущихся поверхностей

Область от точки 1 до точки 2, в которой согласно общим закономерностям эволюции трибосистемы «рис. 1» имеет место образование («впрыск») неравновесных вакансий, зарождающимися очагами предельного деформационного упрочнения, возможно обозначить как область преимущественно вакансионных механизмов пластичности и

схватывания. Здесь естественно *вакансионная гипотеза схватывания* вполне созвучна сути механизма, активирующего пластическую деформацию. Область точек 1-2 следует показать вторым этапом схватывания.

В точке 2 максимума трения имеем условие [2] существования суперпозиции двух равных эффективных объемов — одного дислокационно упрочненного, второго — вакансионно «накачанного». С одной стороны — это предельное энергетическое состояние контактного объема (поверхности) — *энергетический порог схватывания*. Соответственно точка 2 характеризует *существо энергетической гипотезы схватывания*. С другой стороны, в этой точке, по сути взаимодействия дислокационных и вакансионных полей, мы имеем эффект высокой пластичности (сверхпластичность). Здесь совокупные дислокационно-вакансионные механизмы пластичности адекватно могут быть сведены к *дислокационно-вакансионной гипотезе схватывания* в целом, а также как к дислокационной, так и вакансионной гипотезам.

Более того, спонтанное образование связей между поверхностями и с веществом окружающей среды в условиях достижения энергетического порога схватывания, определяет *принцип электронной гипотезы схватывания*. Факт образования связи есть факт восстановления электронного равновесия на активном и не сбалансированном по связям поверхностном атомном (активном) центре.

Вакансионно-дислокационный механизм обеспечения пластичности (перетаскивания дислокаций) сводится к диффузионному механизму переползания дислокаций, самодиффузии по вакансиям, а также к диффузионному механизму взаимообмену веществом поверхностей и транспортировке элементов вещества окружающей среды вглубь от поверхности трения, и др. Естественно данные факты можно относить к представлениям *диффузионной гипотезы схватывания*.

Вывосвобождаемая на межповерхности при образовании связей скрытая (упругая) энергия активных центров трансформируется в тепловую, внутреннюю энергию — эффект саморазогрева и температурной вспышки. Это в свою очередь дополнительно фактор, способствующий диффузии.

Таким образом, точка 2 формализует центральный этап схватывания.

Область от точки 2 до точки 3 может рассматриваться как область развитой поверхностной температурной вспышки точки 2.

Эта вспышка возникает на межповерхности при образовании связей и разрастается до уровня макрофлуктуации (вспышки) температуры в контактном объеме трения. Естественно, что такая трансформация энергии приводит к существенному снижению уровня накопленной скрытой энергии ΔU_e в точке 3 за счет протекания процессов структурной перестройки предельно активированного (предельно разупорядоченного) объема трения точки 2. Такая перестройка имеет черты и особенности физико-материаловедческого структурирования и есть не что иное, как динамическая рекристаллизация. С другой стороны, характерная температура трения в точке 3, равная $0,5T_s$, есть наравне с условием рекристаллизации и условие структурирования по химическому признаку, т.е. это условие протекания химических реакций в объеме трения.

Все это приводит к формированию в точке совместности 3 и далее до точки 4 новых равновесных (совместимых) вторичных (модифицированных трением) структур. Следовательно, очевиден факт правомочности рекристаллизационных представлений о схватывании. Здесь же эффект образования вторичных структур трения, как завершающего этапа схватывания, можно трактовать как основной фактор существования пленочной гипотезы схватывания. Для того чтобы добиться схватывания трибосистемы в точке 3 и далее до точки 4 (область совместности) нужно разрушить такие структуры, т.е. существенно активировать систему и перевести ее на уровень точки 2 – энергетического порога схватывания.

Таким образом, область точек 2-3 возможно рассматривать как четвертый (IV) этап схватывания «рис. 2». Область же точки 3 и ее окрестности справа, где существует возможный спектр различных структур совместимого трения вполне возможно представить самостоятельным конечным пятым (V) этапом, где проявление схватывания (фактическая площадь контакта) минимизировано в зависимости от структурного совершенства поверхностных, диссипативных слоев (пленок). Соответственно, в этой области эффект пленочной гипотезы схватывания первостепенен.

Особенности схватывания как сильновозбужденного состояния контакта

Сложность, неоднозначность и противоречивость проявления феномена схватывания наиболее наглядны при анализе поведения термодинамической системы в окрестности точки 2 максимума трения.

В каждой точке диаграммы имеет место равновесие и соблюдается принцип баланса. Различия отдельных состояний связаны с особенностями, например, возврата энергии деформации и степени согласованности процессов накопления и высвобождения энергии по времени действия внешнего возмущения. В одних случаях, система только успевает накапливать энергию внешнего воздействия в виде скрытой энергии, и высвобождение энергии происходит уже после разрушения системы. В других случаях, система (контакт) успевает за время действия внешнего возмущения как накапливать энергию, так и высвобождать ее.

Область точек 0-1 («рис. 3» – область I) – область деформационного упрочнения (III тип фрикционной связи без учета I и II фрикционных связей в начале области). Внешнее возмущение продуцирует накопление внутренней (скрытой) энергии различного рода дефектов (преимущественно дислокаций). При достижении критического состояния в локальных объемах, ответственных за разрушение, материал хрупко разрушается. Процессы возврата энергии протекают уже в отделившихся частицах износа. Энергия рассеивается (деградирует) в энергию безотносительного движения в окружающую среду. Система открытая. Имеем рассогласование процессов накопления энергии и высвобождения.

Область точек 1-2-3. Состояние схватывания. В этой области нет разрушения. Система закрывает.

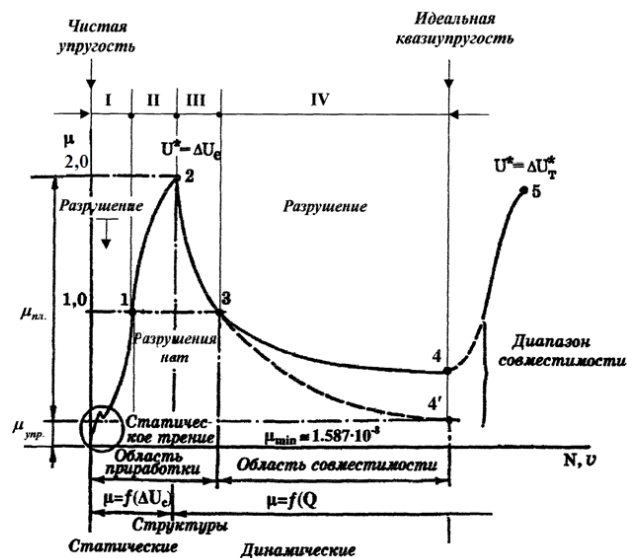


Рис. 3. Специфика баланса энергии для различных состояний трибосистемы при ее эволюции: I – возврат в частицах износа; II – возврат в виде скрытой энергии “впрыска” неравновесных вакансий; III – возврат в виде температурной вспышки; IV – возврат энергии диссипативными структурами трения

Эта область 1-2-3 имеет различия по закономерностям высвобождения энергии в её левой 1-2 и правой 2-3 зонах. В зоне 1-2 «рис. 3» за счёт условия равенства работ внешних и внутренних сил (в точке 1 – $\mu = \Delta U_e / Nl = 1; \Delta U_e = Nl$), накопление энергии – это скрытая энергия дислокационного упрочнения, а энергия возврата – это энергия неравновесных вакансий, которые образуются очагами предельного дислокационного упрочнения. Особенность (уникальность) возврата энергии здесь заключается в том, что энергия успевает высвободиться в процессе её накопления, но при этом ее механизмом возврата является механизм накопления энергии.

Такое высвобождение энергии протекает внутри самой закрытой системы из одного эффективного объема контакта в другой. Этот механизм внутреннего возврата обуславливает эффект сильновозбуждённого состояния всей системы и определяет состояние равновесия в точке 2 предельного трения. Здесь собственно равновесие – это суперпозиция двух объёмов системы: дислокационно-упрочнённого и вакансионно «накачанного». Эффективный объем, накопивший скрытую энергию деформации, вдвое больше эффективного объема в условиях предельного деформационного упрочнения точки 1. Собственно данный факт определяет принципиальную величину коэффициента трения, равную двум, на структурно-энергетической диаграмме трущихся поверхностей «рис. 1,2,3».

В итоге имеем равновесие вдали от равновесного состояния. Однако максимальная удалённость этого равновесия от равновесия исходного (термодинамического ($u_e = u_{e0} \cong 0; T \cong 0$)) характеризует максимальную степень неравновесности всего процесса.

В зоне 2-3, области процесса схватывания 1-2-3 «рис. 3» – это область III, возврат энергии также имеет вид внутреннего (динамического) возврата, но со своей спецификой. Возврат представляет собой преобразование части скрытой (потенциальной) энергии предельного состояния точки 2 в энергию связанную – тепловую ΔU_T . Такой возврат обуславливает эффект тепловой вспышки в системе. В целом, система опять в равновесии, так как плотности тепловой Δu_T и скрытой Δu_e энергии объема трения в точке 3 равны. Сама же система по её отношению к состоянию термодинамического (исходного) равновесия предельно неравновесная.

В области схватывания 1-2-3 формируется критический объем трения – наименьший объем, накопивший скрытую (потенциальную) энергию

ΔU_e предельной величины (плотности u_e^*). Собственно понятие о критическом объеме трения созвучно с понятием А.П. Семёнова об энергетическом пороге схватывания.

Обозначенные существенные черты максимального трения (в состоянии схватывания) указывают на место этого феномена в цепочке эволюционных преобразований самой системы к её наиболее равновесному состоянию в динамике.

Ограничивает область процесса схватывания собственно область совместимого трения 3-4 («рис.3» – это область IV), в которой система становится открытой, степень неравновесности понижается, появляется внутренняя диссипативная равновесность. Область нормального, механо-химического износа (IV тип фрикционной связи) [3,4]. Особенность этой области в том, что возврат энергии здесь имеет черты обратимости (с различной степенью). Энергия возврата (собственно энергия диссипативных структур) по плотности \vec{q} , равная предельной накапливаемой скрытой энергии u_e^* [2], как бы возвращается внешнему, упорядоченному движению, поддерживая его на внутреннем уровне. Так называемое структурное рассеяние энергии, стимулирующее упругие ротационные моды пластичности.

Таким образом, здесь в области IV «рис. 3» система успевает за акт внешнего воздействия возвращать часть накопленной внутренней энергии внешнему относительному (упорядоченному) движению. Имеет место поддержание внешнего движения на внутреннем (атомно-молекулярном) уровне. Способность диссипативных структур к реализации кооперативных и максимально рассеянных по объему системы, ротационных мод пластичности по существу представляет эффект квазиобратимого возврата энергии внешнего возмущения. Наиболее наглядно идеальное состояние такого внутреннего и динамического равновесия (точка 4') можно интерпретировать, например, моделью нано-квантового демпфирования поверхностей [5]. Трибосистема, структурно упорядоченная совокупностью механических квантов (трибосистем), обладает внутренней подвижностью за счет их ротационно-колебательного проворота относительно друг друга с минимальным упругим сопротивлением. Хотя степень неравновесности (возмущённости) всей системы предельно высока ($\vec{q} = u_e^*$), система, благодаря упорядоченному и равномерному рассеянию энергии по структурным элементам, обладает высоким уровнем внутреннего (динамического) равновесия. При этом её состояние

в пределе (точка 4') становится настолько близким к равновесию термодинамическому, что оно почти неотличимо от исходного и чисто упругого (обратимого) равновесия. Однако, данное равновесие располагается по другую сторону эволюционной кривой системы «рис. 1,2,3». Такое предельное (квазиупругое) равновесие системы в динамике можно идентифицировать аномально-низким трением с эффектом безызносности. Потеря системы в таком состоянии – это один механический квант износа или же одна трибоподсистема [5].

Заключение

Рассмотренное выше существо процесса схватывания позволяет обозначить данный феномен как эффект состояния равновесия, расположенного

далеко от состояния термодинамического равновесия. Лаконичная «простота» данной трактовки схватывания убедительно характеризует собственно всю сложность феномена схватывания.

- [1] Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании / А.П. Семёнов. – М.: АН СССР, 1953. – 120 с.
- [2] Федоров С.В. Структурно-энергетическая интерпретация трибосистемы // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – №2. – С. 186-195.
- [3] Поверхностная прочность материалов при трении / Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. – К.: Техника, 1976. – 296 с.
- [4] Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов - М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
- [5] Fedorov S.V. Nano-Structural Standard of Friction and Wear // Tribology in Industry. – 2018. – Т. 40. – №. 2. – С. 225-238.

ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ НОВЫХ СОСТАВОВ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ СТЕРЖНЕЙ РАПС В ТРИБОКОНТАКТЕ «КОЛЕСО-РЕЛЬС»

¹Фейзова В.А. *, ²Озябкин А.Л.

*E-mail: valentina.feizova@yandex.ru

¹АО «ИНТЕР РАО-Электрогенерация» филиал Уренгойская ГРЭС, г. Новый Уренгой, Россия;

²ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону, Россия.

Представлены результаты теоретических расчетов величин энергии активации взаимодействия шероховатостей колеса и рельса. Показано, что в трибоконтакте достаточно энергии для возникновения адгезионных пленок исследуемого смазочного материала. Представлены результаты экспериментальных исследований новых составов смазочных материалов. Доказана эффективность работы присадки, подобранной на основе расчета величины энергии активации взаимодействующих поверхностей трибоконтакта и присадки.

Ключевые слова: энергия активации, смазочный материал, трибоконтакт, колесо-рельс, износ гребней бандажей, ГРС-РАПС, твердосмазочные стержни.

Введение

В трибоконтакте «колесо-рельс» взаимодействия поверхностей катания колес подвижного состава и боковой поверхности головки

ACTIVATION ENERGY OF NEW COMPOSITIONS OF SOLID-LUBRICANT RAPSE RODS IN THE "WHEEL-RAIL" TRIBOCONTACT

Feizova V.A., Ozyabkin A.L.

The results of theoretical calculations of the values of the activation energy of the interaction of wheel and rail roughness are presented. It is shown that there is enough energy in the tribocontact for the formation of adsorption films of the studied lubricant. The results of experimental studies of new compositions of lubricants are presented. The effectiveness of the additive selected on the basis of the calculation of the activation energy of the interacting surfaces of the tribocontact and the additive has been proved.

Keywords: activation energy, lubricant, tribocontact, wheel-rail, wear of bandage ridges, GRS-RAPS, solid lubricant rods.

рельсов железнодорожного пути активируют трибохимические реакции путем столкновения шероховатостей металлических поверхностей тела и контртела. Образовавшаяся энергия запускает

процессы, изменяющие свойства контактирующих материалов тела, контртела и «третьего тела» - смазочного материала.

В работе [1] на основе кинетической теории трения предложен метод подбора присадки к смазочному материалу для заданных фрикционных условий в трибоконтакте на основе расчета величины среднего потенциального барьера ΔU проскальзывания шероховатостей трибоконтакта и преобразование найденной величины в энергию активации E_a . Выбор необходимой присадки предлагается осуществить через поиск веществ с величиной энергии активации E_a , определяемой физико-химическими реакциями рассматриваемого вещества. Величина энергии активации должна быть максимально близка к расчетной для инициации процессов изменения поверхностных свойств контактирующих материалов тел трибоконтакта.

Цель данной работы заключается в практическом подтверждении выдвинутой теории [1] подбора присадок к смазочному материалу трибоконтакта «колесо-рельс» на основе расчета энергии активации взаимодействия присадок и шероховатостей трибоконтакта «колесо-рельс».

Материалы и методы

В данной работе для улучшения лубрикации трибоконтакта рассматривалось взаимодействие металлических контактирующих поверхностей колеса (или рельса) и частиц присадки твердосмазочных стержней РАПС производства РГУПС.

Энергия активации взаимодействия шероховатостей колеса (или рельса) и присадок смазочного материала рассчитывалась по преобразованной формуле (1):

$$E_a = \mu Q (\sigma_{ef})^3 N_A / n_{mol}, \quad (1)$$

где μ – величина коэффициента трения;

Q – среднее давление на поверхностях шероховатостей в контакте, [Па];

σ_{ef} – непосредственный контакт тела и контртела, [м];

N_A – число Авогадро;

n_{mol} – число контактирующих пар молекул или атомов.

Число контактирующих пар молекул или атомов n_{mol} рассчитывалось из представлений, что площадь пятна контакта атома или адсорбированной молекулы присадки с поверхностью шероховатости колеса (или рельса) s_0 соизмерима с одним из размеров частиц [1]: атома $\alpha-Fe$ $s_0 = 8,2 \cdot 10^{-20}$ (м²); наночастицы $s_0 = 40 \cdot 10^{-20}$ (м²); группы CH_2 $s_0 = 10,8 \cdot 10^{-20}$ (м²).

Среднее давление на поверхностях двух шероховатостей в контакте Q было принято равным $Q_1 = 100$ МПа и $Q_2 = 650$ МПа, что соответствует нижнему и верхнему пределу упругости углеродистой стали соответственно.

Таким образом, был определен диапазон практически полезной величины энергии активации для рабочего состояния трибоконтакта «колесо-рельс» при заданном коэффициенте трения $\mu = 0,16$.

Непосредственный контакт тела и контртела σ_{ef} принят равным высоте шероховатостей, соответствующих стандартам технических условий изготовления железнодорожного колеса и рельса [2, 3]: $R_z 40$ и $R_a 10$ первого класса точности изготовления, $R_z 80$ и $R_a 20$ второго класса точности изготовления. Результаты расчетов энергии активации взаимодействия E_a шероховатостей колеса и рельса представлены в таблице 1.

Табл. 1. Энергия активации взаимодействия шероховатостей колеса и рельса E_a , кДж/моль

σ_{ef} , м	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
	$s_0 = 8,2 \cdot 10^{-20}$ м ²		$s_0 = 40 \cdot 10^{-20}$ м ²		$s_0 = 10,8 \cdot 10^{-20}$ м ²	
$R_z 40$	31600	1110000	15400	5390000	41600	1460000
$R_a 10$	7900	276000	38500	1350000	10400	364000
$R_z 80$	63200	221000	308000	10800000	83200	2910000
$R_a 20$	15800	553000	77100	270000	20800	728000

Известно, что сила межмолекулярного (и межатомного) взаимодействия характеризуется величиной энергии адгезионной связи и равняется 10 – 20 кДж/моль [4]. С учетом полученных табличных данных можно говорить о том, что величины энергии взаимодействия тел трибоконтакта «колесо-рельс» достаточно для запуска процессов изменения свойств поверхностей тела и контртела с «третьим телом» путем образования адгезионных слоев смазочного материала.

На основе величин энергий активации физико-химических реакций веществ, которые были найдены в справочных материалах и научных работах, сформирован ряд присадок (табл. 2.). Из представленного ряда были выбраны доступные вещества.

Базовым веществом стержня РАПС является битум – углеводородное вещество с высокой адгезионной способностью, энергия активации ван-дерваальсового притяжения 0,4 – 40 кДж/моль, химически-валентных сил 40 – 400 кДж/моль, разрушения адгезионного соединения битума с гранитом 136 кДж/моль [5].

Табл. 2. Энергии активации вязкого течения расплавов
некоторых веществ

Название присадки	E_a , кДж/моль
Полиэтилен линейный	30
Полиэтилены разветвленные	70
Сополимер тетрафторэтилена	125-145
Гексафторпропиленом	125-145
Поливинилхлорида	125-145
Натуральный каучук	33
Полиизобутилены	41-54
Бутадиенстирольные каучуки (типа СКС-30)	37-54
Полипропилен высокой плотности	25-30
Полипропилен	45-75
Поливинилхлорид	105-205
Поликапроамид	62-68
Полигексаметилендиамид	64-80
Полиэтилентерефталат	65-86
Триацетат целлюлозы	250-280
Эпоксидановые олигомеры	60
Битум	400

Известно, что энергия активации деструкции разветвленного полиэтилена равна 267 кДж/моль, а строго линейного (полиметилена) 300 кДж/моль. Кинетика разрушения полиэтилена определяется термофлуктуационным разрывом слабых связей С–С при этом выделяется около 106 кДж/моль энергии [6].

Одним из вариантов присадок был выбран полиэтилен низкого давления (ПНД), который относится к полимерам-термопластам, обладающим прочностью и стойкостью к большим нагрузкам, плавкостью при повышении температур выше 125-132 °С [7].

Так же в качестве очередной присадки к стержням РАПС использовался полиуретановый клей [8], состоящий из раствора уретанового каучука и изоцианатного отвердителя. Длинные цепи каучука с энергией активации порядка 125 кДж/моль [9] способны вращаться вокруг валентных связей основной цепи, что определяет эластические свойства полимера [10].

В качестве следующей присадки был выбран графит - минерал, состоящий из упорядоченно расположенных молекул углерода с энергией активации теплоты плавления порядка 100 кДж/моль [11]. Особое расположение молекул углерода определяет важные трибологические свойства твердых смазочных материалов – малую прочность на сдвиг и высокую несущую способность смазочных материалов (рис. 2).

Подобная структура веществ (например, гексагональный нитрид бора, сульфиды, селениды, теллуриды, хлориды, фториды, иодиды, оксиды некоторых металлов (PbO, Bi_2O_3 и др.) создает возможность улучшать антифрикционные свойства смазочных материалов.

Дисульфид молибдена (MoS_2) представляет собой черный кристаллический порошок, подобно графиту образует адсорбционный слой (рис. 1.) на металлической поверхности контактирования тела и контртела. Энергия прямых переходов H_2-Mo_{82} составляет 184 кДж/моль [12].

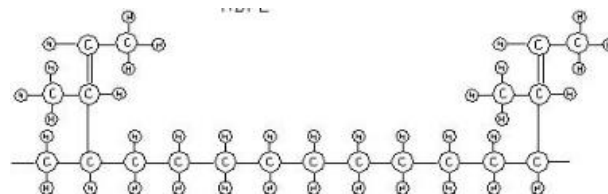


Рис. 1. Молекула полиэтилена низкого давления

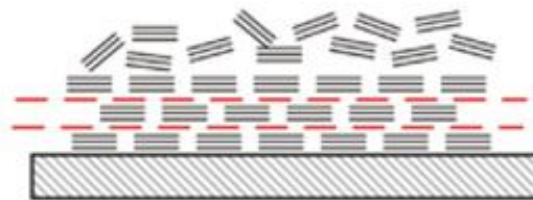


Рис. 2. Схема образования слоя графита [9]

Результаты и обсуждение

При создании вариантов модификаций составов твердосмазочных стержней РАПС в качестве присадок использовались вышеописанные вещества различной пропорциональности к базе и загустителям с учетом Допуска К-91у от 24.01.2000 и ТУ 0254-001-01116006-2006 изготовления стержней РАПС.

Оптимизация состава твердосмазочных стержней для лубрикации трибоконтакта осуществлялась в ходе лабораторных испытаний всех разработанных вариантов материалов на машине трения ИИ 5018 [14] при использовании метода амплитудно-фазочастотного анализа [15], который позволил отобрать по лучшим результатам четыре варианта составов с разными присадками.

Сводная диаграмма результатов испытаний (рис. 3) по определению триботехнических характеристик новых смазочных материалов, созданных на основе метода подбора присадок [1], иллюстрирует лучшие адгезионные свойства и длительность стабилизации коэффициента трения на низком уровне смазочного материала на основе битума с присадкой полиэтилена (ЧП №3) [11].

На основе полученных зависимостей функций диссипации механической энергии от времени была оценена общая энергия активации лучшего материала ЧП№3 в среднем равная 85 кДж/моль, что соответствует энергии реакции полимеризации соединений с двойными связями.

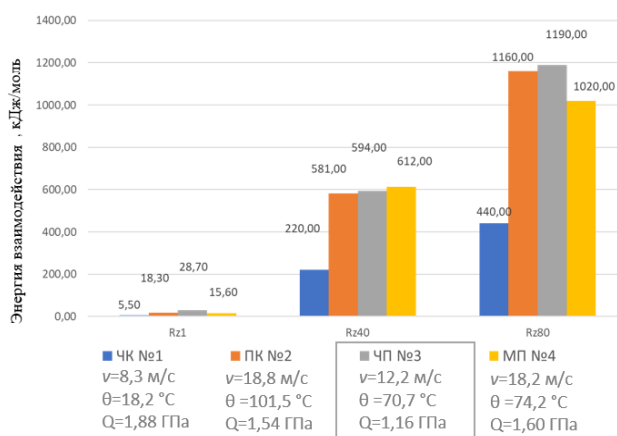


Рис. 3. Оценочные расчеты лабораторных испытаний новых составов смазочных материалов

Таким образом, мы полагаем, что энергии взаимодействия шероховатостей металлических поверхностей трибоконтакта и выбранной присадки смазочного материала ЧП №3 (полиэтилена) достаточно для создания адгезионного слоя смазочного материала на контактирующих поверхностях. осуществления процесса плакирования полиэтиленом металлических поверхностей контакта «колесо-рельс».

Сравнительные эксплуатационные испытания новых (ЧК №1, ПК №2, ЧП №3, МП №4) и базового составов твердосмазочных стержней РАПС ТУ 0254-001-01116006-2006 проводились на маневровом тепловозе ЧМЭ-3э ООО «РЖД» ст. Лихая Северо-Кавказской железной дороги.

В результате испытаний установлено, что из всех модификаций стержней РАПС, установленных в конструкции ГРС локомотива, наилучший результат получен для рецептуры РАПС ЧП №3, с увеличением рабочего ресурса стержня относительно базового стержня РАПС на 52%, для ЧК №1 - на 26%, для ПК №2 - на 23%.

Многолетние эксплуатационные испытания твердосмазочных стержней РАПС ЧП №3 с навесным технологическим оборудованием ГРС-40.05 проходили на локомотивах серии ТЭМ-7А Сургутского филиала ООО «Газпромтранс». В результате интенсивность изнашивания гребней колес локомотивного парка снизилась до 0,12 мм на 10 тыс. км. Ресурс разовой заправки технологического оборудования ГРС-40.05 в среднем составил 20 тыс. км

Заключение

На основе расчета энергии активации взаимодействия присадок и шероховатостей трибоконтакта «колесо-рельс» подобрана присадка, достаточно хорошо улучшающая трибологические свойства твердосмазочного материала, в частности

стержней РАПС производства РГУПС, широко применяемых железнодорожными компаниями России.

Эффективность работы присадки подтверждена и зафиксирована актами проведенных стендовых и эксплуатационных испытаний твердосмазочных стержней.

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «Транс-Триботехника» (шифр работы 228).

- [1] Булгаревич С.Б., Бойко М.В., Лебединский К.С. Целенаправленный выбор присадок к жидким смазочным материалам при смешанном и граничном трении // Трибология – машиностроению: Труды XI международной научно-технической конференции. – М.: Институт компьютерных исследований, 2016. – С. 33-35.
- [2] ГОСТ 10791-2011 Колеса цельнокатаные. Технические условия.
- [3] ГОСТ Р 51685-2013 Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.
- [4] Долгоносов А.М. Модель межмолекулярного взаимодействия общего типа между молекулой и жидкой фазой, основанная на теории обобщенных зарядов // Сорбционные и хроматографические процессы, 2020. – Т. 20. № 3. – С. 343-361.
- [5] Башкарев А.Я., Беспалова Н.Н. Зависимость адгезии битума от температурно-временных режимов приготовления асфальтобетонных смесей. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 1(190). – 2014. – С. 186-190.
- [6] Полиэтилен и полиметилен. Справочник химика. // Эл. ресурс <https://www.chem21.info/info/1861157/>.
- [7] Свойства и технические характеристики полиэтилена. // Эл. ресурс <https://propolyethylene.ru/index/svoystva.html/>
- [8] Полиуретановый клей. Состав, приготовление и применение. // Эл. ресурс <https://www.promelectroavtomat.ru/novosti/retsepty/poliuretanovy-j-klej-sostav-prigotovlenie-i-primenenie.html>.
- [9] Дорожкин В.П., Кимельблат В.И., Аверко-антонович Ю.О., Изучение взаимодействия сложноэфирного уретанового каучука с сажей ПМ-70. // Высокомолекулярные соединения. – 1974. – Т.(А) XVI. – №9. – С. 2024-2028.
- [10] Шашок Ж.С. Технология эластомерных композиций. Тексты лекций для студентов. Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». // Эл. ресурс <https://core.ac.uk/download/pdf/143998036.pdf>
- [11] Шахов Ф.М., Кидалов С.В. Влияние фуллеренов на энергию активации фазового перехода графит–алмаз. Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56 (8). – С. 1571-1574.
- [12] Иртегов Ю.А. СВС-технология дисперсных дисульфидов вольфрама и молибдена с наноразмерными слоями для трибологических композиций. Дисс.канд.наук. Специальность ВАК РФ 05.17.11 – 2014.
- [13] Кононов А.А. и др. Поляризационные процессы в тонких слоях аморфного MoS₂, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления //Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54. – №. 5. – С. 461-465.
- [14] Фейзова В.А., Озябкин А.Л. Оптимизация состава смазочных материалов для лубрикации зоны контакта колеса с рельсом в кривых малого радиуса // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2019»: Т. 1. – Ростов н/Д: РГУПС. – 2019. – С. 355-359.
- [15] Шаповалов В.В., Озябкин А.Л., Харламов П.В., Фейзова В.А. и др. Патент № 2517946, РФ. Способ динамического мониторинга трения мобильных систем. – 2014.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИСАДКИ Cu_2O НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СМАЗОЧНЫХ СЛОЁВ ПРИ ТРЕНИИ В СРЕДЕ ВАЗЕЛИНОВОГО МАСЛА

Фоминов Е.В. *, Задошенко Е.Г., Шучев К.Г.

*E-mail: fominoff83@mail.ru

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Исследовано влияние концентрации присадки в виде наночастиц одновалентного оксида меди на характеристики динамического процесса формирования смазочных плёнок при трении в среде вазелинового масла. Экспериментально установлено, что концентрации присадки в пределах от 0,2 до 0,7% позволяют достичь минимальных коэффициентов трения в трибосистеме на фоне высокого экранирующего эффекта смазочного слоя. В этом случае отношение интенсивностей роста и разрушения поверхностных экранирующих структур достигало максимальных значений, что сопровождалось наиболее быстрым ростом толщины смазочной плёнки и разделением поверхностей контактирующих тел.

Ключевые слова: присадки, оксид меди, граничное трение, поверхностные структуры, экранирующее действие.

Наличие смазочного материала в зазоре между телами, находящимися в процессе фрикционного взаимодействия, уменьшает вероятность контакта поверхностных микронеровностей. При этом более высокие значения толщины смазочной плёнки обеспечивают снижение числа микронеровностей, находящихся в состоянии пластических и упругих деформаций, что в свою очередь приводит к понижению коэффициента трения. Формирование смазочного слоя носит динамический характер, одним из возможных сценариев которого является рост толщины промежуточного слоя в результате процессов самоорганизации. Увеличение толщины смазочной плёнки становится возможным за счёт роста поверхностных экранирующих структур с аномальными, отличными от основного объёма смазки, физико-механическими свойствами [1]. Средние значения коэффициента трения в этом случае будут зависеть не только от предельно возможной толщины плёнки, но и от того, насколько интенсивно происходил её рост.

THE EFFECT OF Cu_2O ADDITIVE CONCENTRATION ON THE FORMATION OF LUBRICATING LAYERS DURING FRICTION IN THE PETROLEUM OIL MEDIUM

Fominov E.V., Zadoshenko E.G., Shuchev C.G.

The influence of the concentration of the additive in the form of nanoparticles of monovalent copper oxide on the characteristics of the dynamic process of formation of lubricating layers under conditions of friction in the environment of petroleum oil has been studied. It has been experimentally established that additive concentrations ranging from 0.2 to 0.7% allow to achieve minimum coefficients of friction in the tribosystem against the background of a high shielding effect of the lubricating layer. In this case, the ratio of the intensities of growth and destruction of surface shielding structures reached maximum values, which was accompanied by the fastest increase in the thickness of the lubricating layer and the separation of the surfaces of the contacting bodies.

Keywords: additives, copper oxide, boundary friction, surface structures, shielding effect.

Одним из способов изменения структуры плёнки и процесса её формирования является введение в состав базового смазочного материала наночастиц различных химических соединений. Получение смазок коллоидной формы позволяет улучшить свойства базового смазочного материала, что проявляется в повышении износостойкости элементов пар трения, снижении коэффициентов трения и температуры контакта [2]. Улучшение фрикционных свойств жидких смазочных материалов достигается введением в них нанокластеров Au, Cu, SiO_2 , ZrO_2 и Cu_2O в концентрациях от 0,05 до 2% [2-5]. Дальнейшее увеличение концентрации присадки приводит как правило к ухудшению триботехнических характеристик коллоидного раствора в сравнении с чистым маслом.

В соответствии с научным подходом [6], динамический процесс формирования смазочной плёнки в режиме граничного/смешанного трения может быть охарактеризован следующими параметрами: l – интенсивность роста

поверхностных структур [с^{-1}]; m – интенсивность разрушения поверхностных структур [с^{-1}].

Оценка численных значений интенсивностей роста l и разрушения m производится с использованием экспериментальных данных, в результате анализа кривых, описывающих кинетику роста толщины смазочной плёнки y во времени τ , по следующему выражению:

$$y(\tau) = \frac{l}{l+m} \exp[-(l+m) \cdot \tau]$$

Отношение трибопоказателей l/m позволяют оценить, насколько интенсивно происходит формирование смазочного слоя, содержащего поверхностные экранирующие структуры.

Целью настоящего исследования является оценка влияния концентрации присадки Cu_2O на параметры формирования смазочного слоя при трении в модельной среде вазелинового масла.

Материалы и методы

Оксид меди (I) получали термическим разложением органической соли валерат меди при температуре $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течении 100 минут. Характеристики полученных частиц изучались методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ARL X'TRA, седиментационным анализом с применением дисковой центрифуги CPS Disk Centrifuge DC2400, атомно-силовой микроскопией на сканирующем зондовом микроскопе марки PHYWE Comprat. Синтезированные частицы Cu_2O диспергировали в вазелиновое масло, используя ультразвуковую ванну в течении 30 минут. Исследование процесса трения осуществлялось на трибометре T-11 (Польша) по схеме трения «палец по диску». Материал цилиндрических инденторов диаметром 5 мм – Сталь 45, материал контртела (диска) – сталь 30ХГСА. Процесс трения осуществлялся в среде вазелинового масла, содержащего присадку Cu_2O в концентрациях $C = 0,05; 0,1; 0,25 \dots 2,0\%$. В ходе опытов продолжительностью 1600 с (путь трения 4000 м) при постоянной нагрузке $P = 20\text{ Н}$ и скорости скольжения $v = 0,4\text{ м/с}$ фиксировались коэффициент трения f и перемещение индентора относительно контртела y в течение времени τ .

Результаты и обсуждение

В процессе термического разложения органических солей могут образовываться как чистые металлы, их оксиды, а также нанопорошки, где каждая частица покрыта оболочкой органического вещества. Поэтому для уточнения фазового состава был проведен рентгенофазовый анализ. На рентгенограмме отмечали наиболее

интенсивные линии с соответствующими им углами 2θ и интенсивности и сравнивали значения с табличными данными базы картотеки, используя пакет программ Match!. Анализ рентгенограмм показывает, что основным продуктом пиролиза является оксид меди (I) (рис.1).

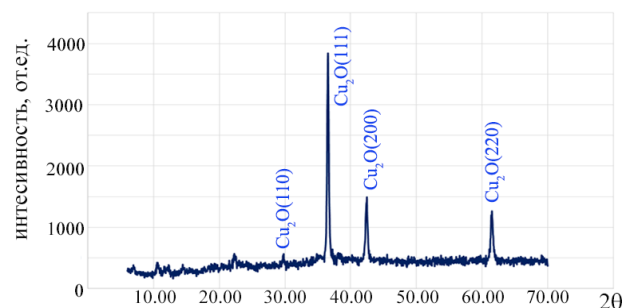


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа.

На основе данных рентгенограммы и формулы Дебая-Шеррера (1) провели расчет размеров нанокристаллитов в порошке, который составил 32,3 нм:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\cos \theta} \quad (1)$$

где D – средний размер исследуемого кристалла в объеме пленки; $\lambda = 1,54056\text{ нм}$ – длина волны рентгеновского излучения, используемого в дифрактометре; β – ширина рефлекса на полувысоте (в радианах); θ – угол дифракции (брэгговский угол).

Исследования синтезированного порошка седиментационным методом показали, что частицы имеют полидисперсный характер со следующим распределением по размерам: 90 % частиц находится в диапазоне от 20 до 70 нм, с максимумом в 22 нм – 30% наночастиц.

Расхождение размеров частиц с данными РФА и седиментационного анализа связано с различиями обработки данных. Если рентгеновские методы рассматривают распределение частиц по объему, то седиментационный анализ учитывает количество частиц. Кроме того, анализ дифракционных данных выполняется из допущения, что все частицы имеют одинаковую сферическую форму и не образуют агрегатов.

Анализ нанопорошка оксида меди методом АСМ показывает, что полученные частицы имеют полидисперсный характер и образуются агломераты овальной формы по высоте не более 45 нм (рис. 2).

Таким образом, можно предположить, что полученные частицы, имеющие наноразмерный диапазон, обладают высокой поверхностной активностью и могут легко осажаться в зоне контакта на стальных поверхностях, образуя

стабильные и непрерывные защитные структуры совместно с вазелиновым маслом.

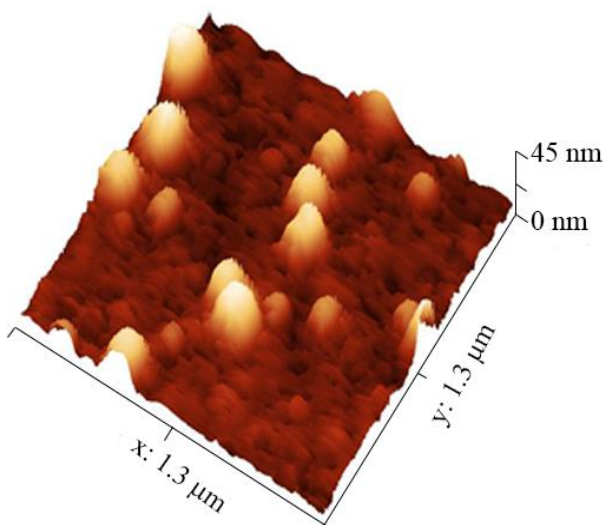


Рис. 2. АСМ изображения частиц оксида меди.

Типичная форма кривой $y(\tau)$ в случае роста толщины поверхностных структур в результате самоорганизации представлена на рис. 3.

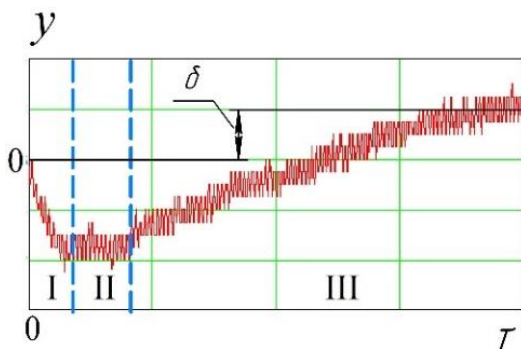


Рис. 3. Кривая $y(\tau)$ в случае роста толщины смазочной плёнки

Можно выделить следующие стадии в эволюции трибосистемы (рис. 3): I – изнашивание (сближение контактирующих тел); II – промежуточная стадия установившегося трения; III – нелинейный рост толщины смазочной плёнки (отдаление контактирующих тел). Параметр δ характеризует изменение геометрии трибоконтакта в конце опыта относительно исходного положения. Отдаление трущихся тел на стадии III может либо превосходить величину износа на стадии I (значение параметра δ положительное как на рис. 3.), либо быть меньше его (δ – отрицательная величина).

Введение присадки во всех концентрациях улучшило характеристики трибосистемы в сравнении с чистым вазелиновым маслом (рис. 4, а,б), для которого были зафиксированы следующие значения исследуемых параметров: $f = 0,107$; $l/m = 4,42$; $\delta = -2,56$ мкм.

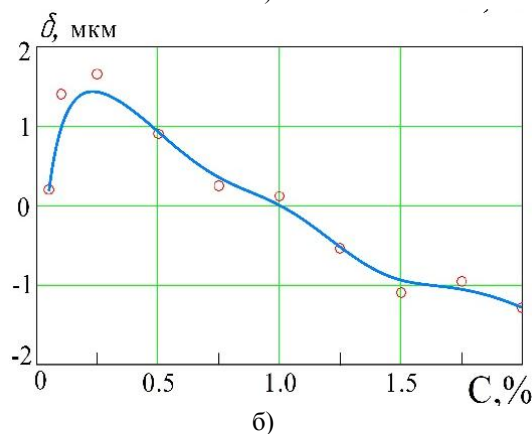
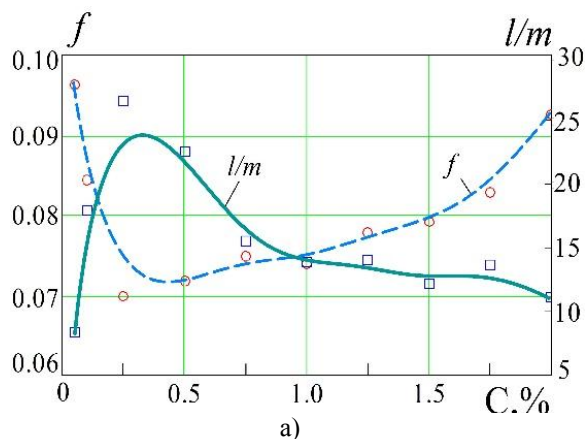


Рис. 4. Зависимость характеристик процесса трения f , l/m (а) и δ (б) от концентрации присадки Cu_2O в вазелиновом масле

На основании анализа регрессионных кривых, которыми аппроксимированы результаты экспериментов на рис. 4, установлено, что границы диапазона концентраций, обеспечивающего максимально благоприятные сценарии функционирования трибосистемы, находится в пределах $0,22\% \leq C \leq 0,7\%$. При указанных значениях концентрации присадки *интенсивность роста* l поверхностных структур значительно превышает интенсивность их разрушения m (в 17-23 раза). В данном случае трибосистема характеризуется как наименьшими средними коэффициентами трения, так и значительным разделением поверхностей трущихся тел за счёт роста толщины смазочной плёнки (рис.4, б).

Заключение

В результате исследования влияния концентрации присадки Cu_2O на характеристики процесса трения в среде вазелинового масла установлено, что наименьшие коэффициенты трения и наибольшее разделение поверхностей трущихся тел (экранирующий эффект) наблюдаются в том случае, когда отношение *интенсивность роста* l поверхностных структур к *интенсивности разрушения* m достигает своих максимальных значений.

- [1] Основы расчетов на трение и износ. / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
- [2] Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke C. Graphite and hybrid nanomaterials as lubricant additives //Lubricants. – 2014. – Т. 2. – №. 2. – С. 44-65.
- [3] Cortes V. et al. The performance of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles as lubricant additives in sunflower oil //Lubricants. – 2020. – Т. 8. – №. 1. – С. 10.

- [4] Acharya B. et al. Nanotribological performance factors for aqueous suspensions of oxide nanoparticles and their relation to macroscale lubricity //Lubricants. – 2019. – Т. 7. – №. 6. – С. 49.
- [5] Abdel-Rehim A. A., Akl S., Elsoudy S. Investigation of the tribological behavior of mineral lubricant using copper oxide nano additives //Lubricants. – 2021. – Т. 9. – №. 2. – С. 16.
- [6] Фоминов Е.В., Шучев К.Г. Динамика процесса надмолекулярной самоорганизации в граничном смазочном слое // Пром-Инжиниринг: труды V всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 72-77.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ MoS₂+Ti И СУСПЕНЗИОННЫХ НА ОСНОВЕ MoS₂ ДЛЯ УСЛОВИЙ НОРМАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ

Хопин П.Н.

E-mail: chopinp@mail.ru

«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия.

Для условий нормальной атмосферы исследованы триботехнические характеристики твёрдосмазочных покрытий (ТСП) на основе MoS₂ комбинированного типа MoS₂+Ti магнетронного и суспензионного нанесения ВНИИ НП 212. Рассчитаны контактные давления, поверхностная температура трения. Показано, что для рассмотренных условий трения линейная интенсивность изнашивания ТСП типа MoS₂+Ti в 0,089 раз меньше, чем ТСП суспензионного нанесения.

Ключевые слова: твёрдосмазочные покрытия, магнетронное и суспензионное нанесение, нормальная атмосфера.

Введение

Твёрдосмазочные покрытия (ТСП) на основе MoS₂ широко используются как в условиях нормальной атмосферы (в машиностроении, оборонной промышленности и др.) [1], так и вакуума (в движущихся механических узлах космических аппаратов, таких как удерживающие и выпускающие механизмы солнечной батареи, карданные и прецизионные подшипники [2,3].

ТСП на основе MoS₂ могут быть нанесены различными методами, а именно – натиранием, суспензионным нанесением со связующими составляющими, диффузионным методом,

COMPARATIVE EVALUATION OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF MAGNETRON-BASED MoS₂+Ti AND MoS₂-BASED SUSPENSION COATINGS FOR NORMAL ATMOSPHERIC CONDITIONS

Khopin P.N.

Tribotechnical characteristics of solid-lubricating coatings (SLC) based on MoS₂ of the combined type MoS₂+Ti magnetron and suspension deposition of VNIINP 212 have been studied for normal atmospheric conditions. Contact pressures and surface friction temperature are calculated. It is shown that for the considered friction conditions, the linear wear intensity of the MoS₂+Ti type SLC is 0.089 times less than the suspension-applied SLC

Keywords: solid lubricating coatings, magnetron and suspension application, normal atmosphere.

магнетронным, высокочастотным распылением и другими методами. Отличительными особенностями магнетронного напыления (МН) покрытий ТСП на основе MoS₂ является нанесение тонких слоёв порядка 1 мкм, более низкие коэффициенты трения и лучшая адгезия, что используется для поверхностной смазки точных движущихся частей. Однако чистые МН ТСП на основе MoS₂ имеют низкий износостойкий срок службы, и MoS₂ может вступать в реакцию с атомарным кислородом на низких околоземных орбитах и водой во влажной атмосфере с образованием MoO₃ и H₂SO₄ [4].

Цели и задачи исследования

В данной работе решалась задача оценки триботехнических характеристик комбинированных ТСП магнетронного нанесения в сравнении с традиционными ТСП суспензионного напыления.

Материалы и методы исследований

Исследовались композиционные ТСП системы $\text{MoS}_2\text{-Ti}$, которые наносились методом ионного напыления замкнутым полем несбалансированного магнетронного распыления (CFUBMSIP) с использованием стандартного оборудования Hauzer HTC-750 на 45 стальных и кремниевых подложках (ТСП_{НН}) [5]. Были использованы две мишени MoS_2 и одна титановая мишень. Процедура начиналась с нанесения 100-нм Ti-прослойки, что приводит к улучшению адгезии покрытия. Трибологические свойства покрытий были испытаны тестером трения и износа шарик-на-диске при влажности воздуха от 30 до 50%. Испытания проводились при контактной нагрузке $N = 5 \text{ Н}$ на диаметре вращения на диске 24 мм, скорость скольжения V составляла 1,257 м/с (1000 об/мин). В качестве контртела использованы шарики из нержавеющей стали 440С диаметром $\varnothing 8 \text{ мм}$. В ходе испытаний постоянно контролировался коэффициент трения ($f_{\text{тр}}$). Износостойкость покрытий (τ) оценивалась числом циклов, при котором $f_{\text{тр}}$ возрастал до 0,2 (основа под покрытие – стальная или кремниевая).

ТСП системы твердые / жидкие космические масла на основе WS_2 , нанесённые высокочастотным напылением и испытываемые по аналогичной схеме трения и близких условиях трибоиспытаний, были получены комбинированием чистой пленки WS_2 с FCPSO (трифторированный пропилен и хлорированный фенил с метиловым концевым силиконовым маслом) и SiCN (силагидроуглероды) (ТСП_{Quan}) [6]. Трибоиспытания проводились по схеме «диск-индентор». В качестве контртел использовались очищенные AISI шарики из стали 440С (HRC~60, Ra~0,10 мкм) диаметром $\varnothing 8 \text{ мм}$, прижатые к вращающимся дискам с нормальной нагрузкой $N = 3 \text{ Н}$. Частота вращения составляла 1000 об/мин., что соответствует линейной скорости $V = 0,52 \text{ м/с}$. Скорости износа (И) были рассчитаны по формуле:

$$I = V/N * L \quad (1)$$

где V – объем износа, N – нормальная нагрузка, а L – путь трения.

ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП 212 наносилось по методике ВНИИ НП толщиной 15 мкм. Трибологические свойства оценивались на модернизированной установке трения,

функционирующей по роликовой схеме трения, с использованием планируемого ортогонального эксперимента 2 порядка.

Сравнительная оценка трибологических характеристик ТСП_{НН} на основе $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ и ТСП ВНИИ НП 212 производилась по величине относительной интенсивности изнашивания I при экспериментальной поверхностной температуре трения $T_{\text{тр}}$. Для расчёта последней требовалось оценить контактное давление P , отсутствующее в работе НН [5]. Поэтому контактная площадь трения оценивалась по данным работы [6], где для аналогичной схемы испытаний «диск-шарик» и близких условий трения приведена величина скорости износа I .

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований, приведённых в работе [6], скорость изнашивания наилучшей пары ТСП_{Quan} состава $\text{WS}_2 + \text{SiCN}$ для условий нормальной атмосферы составила $W = 30 \cdot 10^5$ циклов, что соответствовало пути трения $L = 93600 \text{ м}$. При этом скорость изнашивания вышеуказанного ТСП_{Quan} составила $I = 4,2 \times 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Объём износа ТСП составил $V = 0,01123 \text{ мм}^3$, что соответствовало высоте износа $H = 0,3 \text{ мм}$ и площади износа $S = 0,75 \text{ мм}^2$. Данная величина была принята для оценки площади износа шарикового контртела, что соответствовало контактному давлению $P = 4 \text{ МПа}$. Коэффициент трения установившегося режима $f_{\text{тр}} = 0,07$.

На следующем этапе решалась задача пересчёта контактного давления при трении ТСП_{Quan} состава $\text{WS}_2 + \text{SiCN}$ к условиям трения близкого ТСП_{НН} состава $\text{MoS}_2\text{-Ti}$ (контактная нагрузка в паре шарик-диск $N = 5 \text{ Н}$ при скорости скольжения $V = 1,257 \text{ м/с}$).

Решение данной задачи производилось с использованием расчётной зависимости контактного давления P для ТСП ВНИИ НП 212 в зависимости от контактной нагрузкой N и скоростью скольжения V , полученной автором в результате проведения трибоиспытаний по роликовой схеме [7]:

$$P = 0,0874 \cdot N - 14,94 \cdot V + 14,07 \quad (2)$$

где P – [МПа], N – [Н], V – [м/с].

Зависимость [2] получена в результате проведения планируемого эксперимента для следующих диапазонов варьирования факторов $N = 314\text{-}1286 \text{ Н}$, $V = 0,174\text{-}1,146 \text{ м/с}$, $P = 31\text{-}128 \text{ МПа}$. Пример 1 интерпретации графической корректировки при пересчёте контактного давления P в экспериментах с ТСП_{НН} к условиям скольжения применительно к ТСП_{Quan} представлен на рис. 1.

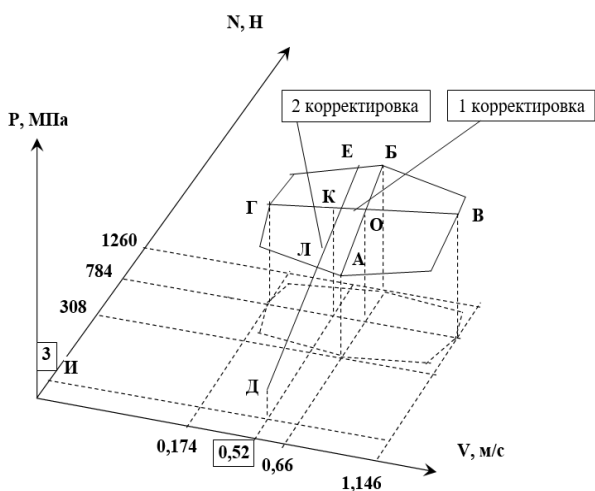


Рис.1. Пример 1 корректировки при графической интерпретации пересчёта контактного давления P в экспериментах с ТСП_{НнИ} к условиям скольжения применительно к ТСП_{Quan}

В результате проведённых расчётов величина контактного давления для условий трения ТСП_{Quan} состава $WS_2 + SiCN$ составила $P_{Quan \text{ ролик}} = 3$ МПа. В результате расчётов применительно к ТСП_{НнИ} состава $MoS_2 + Ti$ величина контактного давления при $N = 5$ Н и $V = 1,257$ м/с составила $P_{НнИ \text{ ролик}} = 10,2$ МПа. Следовательно, корректировка расчётного значения контактного давления при переходе от ТСП_{Quan} к ТСП_{НнИ} может быть осуществлена с помощью корректирующего коэффициента K :

$$K = P_{НнИ \text{ ролик}} / P_{Quan \text{ ролик}} = 10,2/3 = 3,4.$$

Тогда контактное давления для ТСП_{НнИ} составит $P_{НнИ} = 4 \cdot 3,4 = 13,6$ МПа. С использованием формулы, полученной автором для расчёта поверхностной температуры трения для ТСП [7]

$$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 47,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2,$$

где V – [м/с], P – [МПа], $T_{тр.}$ – °С

для диапазонов трения $P = 23,1-133,7$ МПа и $V = 0,096-1,224$ МПа расчётное значение температуры составило $T_{тр.} = 138$ °С.

Анализ данных работы [5] показал, что оптимальное содержание титана с магнетронном ТСП составляет 10-15 %. При этом путь трения $L = 95000$ м. Принимая толщину нанесённого ТСП_{НнИ} $\delta = 1$ мкм, линейная интенсивность изнашивания составит $I = \delta/L = 1,053 \cdot 10^{-11}$. Коэффициент трения установившегося режима составил $f_{тр.} = 0,025$.

Линейная интенсивность изнашивания для ТСП ВНИИ НП 212, рассчитанная с помощью полученной автором зависимости

$$I = 7,034 \cdot 10^{-11} \cdot \exp(0,0035 \cdot T_{тр.}) + 7,049 \cdot 10^{-14} \cdot \exp(0,0296 \cdot T_{тр.})$$

составила $I_{ВНИИ \text{ НП } 212} = 1,18 \cdot 10^{-10}$.

Следовательно, для контактной температуры трения $T_{тр.} = 138$ °С линейная интенсивность изнашивания для комбинированного ТСП состава $MoS_2 + Ti$ магнетронного нанесения в 0,089 раза меньше, чем для ТСП ВНИИ НП 212.

Заключение

В результате проведённых исследований:

1. Определено, что для контактной температуры трения $T_{тр.} = 138$ °С линейная интенсивность изнашивания для комбинированного ТСП состава $MoS_2 + Ti$ магнетронного нанесения в 0,089 раза меньше, чем для ТСП ВНИИ НП 212.

2. Разработана и реализована методика пересчёта контактных давлений с использованием разработанной автором комплексной модели контактного давления от скорости скольжения и контактной нагрузки.

3. Оптимальное содержание включения титана при магнетронном нанесении ТСП на основе MoS_2 составляет 10-15%.

[1] Брейтуэйт Е.Р. Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / Е.Р. Брейтуэйт. - пер. с англ. М.: Химия, 1967. – 320 с.

[2] Hilton M.R., Fleischauer P.D. Applications of solid lubricant films in spacecraft //Surface and Coatings Technology. – 1992. – Т. 54. – С. 435-441.

[3] Teer D.G. et al. The tribological properties of MoS_2 /metal composite coatings deposited by closed field magnetron sputtering //Surface and Coatings Technology. – 1997. – Т. 94. – С. 572-577.

[4] Ross S., Sussman A. Surface oxidation of molybdenum disulfide //The Journal of Physical Chemistry. – 1955. – Т. 59. – №. 9. – С. 889-892.

[5] Zhou H. et al. The effect of Ti content on the structural and mechanical properties of MoS_2 -Ti composite coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering system //Phys. Procedia. – 2011. – Т. 18. – С. 234-239.

[6] Quan X. et al. Tribological behavior of WS_2 -based solid/liquid lubricating systems dominated by the surface properties of WS_2 crystallographic planes //Rsc Advances. – 2015. – Т. 5. – №. 80. – С. 64892-64901.

[7] Хопин П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. – М., МАТИ, –2012, – 255 с.

А.П. СЕМЕНОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ С АЛМАЗОПОДОБНОЙ И НАНОКОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Хрущов М.М.

E-mail: michel_x@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

Описаны результаты исследований по изучению влияния особенностей структурного состояния, химического и фазового состава на трибологическое поведение ряда покрытий, полученных методами реактивного электронно-плазменного и магнетронного распыления и обладающих нанокompозитной структурой, в том числе, содержащих «свободный» углерод и/или алмазоподобную углеродную фазу, начатых автором под руководством А.П. Семенова.

Ключевые слова: вакуумные покрытия, нанокompозитная структура, алмазоподобный углерод, реактивное напыление, магнетронное распыление, легирование, трибологические свойства.

Работами профессора А.П. Семенова, столетию которого посвящена конференция «Трибология–машиностроению–2022», внесен значительный вклад в развитие науки о трении и износе, трибологическое материаловедение, технологию соединения материалов в твердом состоянии и нанесения износостойких и антифрикционных покрытий вакуумными ионно-плазменными методами. В основу настоящего сообщения легли некоторые результаты исследований свойств вакуумных покрытий на основе высокопрочных кристаллических фаз (нитридных, оксидных, карбидных) и аморфного (алмазоподобного) углерода, полученные автором при работе под его руководством, а позднее в рамках совместно проводимых исследований.

Для получения покрытий в описываемых работах использовали технологии вакуумного плазменно-ассистированного нанесения двух типов: электронно-плазменное напыление [1] на установке ЭПН-3 – в более ранних и реактивное магнетронное распыление – в последующих.

Особенностью проводимых исследований был их комплексный характер. Помимо трибологических свойств изучали также особенности структурно-фазового состояния покрытий и их химического состава (рентгеновская дифрактометрия, энергодисперсионный микроанализ); микромеханические свойства (микротвердость, инструментальное наноиндентирование и измерительное царапание);

A.P. SEMENOV AND STUDIES OF COATINGS WITH DIAMOND-LIKE AND NANOCOMPOSITE STRUCTURES

Khrushchov M.M.

The results of the research initiated under the supervision of A.P. Semenov and devoted to study the effects of structural state, chemical and phase composition on the tribological behavior of coatings with nanocomposite structure as well as containing free carbon and/or DLC phases and deposited by ARE and magnetron sputtering are presented.

Keywords: PVD coatings, nanocomposite structure, diamond-like carbon, DLC, reactive deposition, magnetron sputtering, alloying, tribological properties.

структурное состояние углерода и его распределение в покрытиях (спектроскопия комбинационного рассеяния); характер разрушения поверхностей при трении (оптическая и растровая электронная микроскопия).

Как показали исследования [2-4], электронно-плазменные покрытия титана и хрома, полученные напылением в атмосферах CO₂, C₂H₂, N₂ и их смесях, содержали оксидные, карбидные, нитридные фазы, в том числе фазы, не характерные для равновесной диаграммы состояния. Общим для этих покрытий являлось наличие нанокompозитной структуры, содержащей ультрадисперсные включения соответствующих металлов и их фаз внедрения.

Формирование нанокompозитной структуры и неравновесных фаз в покрытиях связано с ионно-плазменным осаждением покрытий, при котором скорость охлаждения потока конденсирующихся частиц достигают ~10⁹ К/с. Степень отклонения от равновесия при вакуумном напылении можно описать «фактором неравновесности», зависящим от атомных свойств покрытия, суммарного теплового потока на подложку, скорости роста и температуры осаждения [5]. Учет тепловых условий напыления и ионизации осаждаемого потока приводит к тому, что условия термодинамического равновесия сдвигаются, и происходит «ужесточение» условий синтеза образующихся фаз и соединений.

Результатами исследований электронно-плазменных покрытий титана и хрома было

установлено [2], что условия взаимодействия с реактивной атмосферой при формировании покрытий были достаточно «жесткими». При данной температуре осаждения они были сдвинуты в область повышенных, по сравнению с равновесными значениями, давлений реактивного газа. При этом наблюдалось образование фаз, отсутствующих на равновесной диаграмме состояния, метастабильных и сильнонеравновесных структур, а реакции взаимодействия металлической паровой фазы с реактивными смесями газов и многокомпонентными газами приводили к полному разложению последних. Это, а также плазменно-активируемое разложение углеводородсодержащих компонентов активной и остаточной атмосфер, ведет к образованию в составе покрытий фаз свободного либо гидрогенизированного твердого углерода. Так, в случае хромовых покрытий, синтезированных в смеси азота и ацетилена (50:50), в композитной структуре образующегося покрытия представлены нанокристаллические (~5 нм) области Cr_3C_2 и хрома, в также области гидрогенизированного углерода в виде «хлопьев» микронного размера. Было установлено, что более высокие антифрикционные свойства некоторых покрытий, полученных в среде углекислого газа, ацетилена и содержащих их смеси, при трении на воздухе могут быть связаны с содержащимися в них включениями углеродной фазы и ее смазочным действием [3, 4]. Некоторые электронно-плазменные покрытия хрома при этом обладали износостойкостью, в пять и более раз превышающей износостойкость аналогичных покрытий нитрида титана [4].

В работах [6,7] было установлено наличие корреляция между режимами нанесения, фазовым составом и структурой покрытий системы хром-кислород, полученных электронно-плазменным напылением в кислороде. Оказалось, что в таких покрытиях фазовый состав, трибологические и механические свойства в значительной степени определяются величиной парциального давления кислорода и температурой подложки. Покрытия Cr-O, полученные при малых парциальных давлениях O_2 , являются многофазными, тогда как полученные при более высоком давлении, содержат только фазу Cr_2O_3 . При этом износостойкость у таких однофазных покрытий оказалась ниже, чем у многофазных [6]. Однотипные корреляции между фазовым составом, содержанием кислорода, трибологическим поведением и составом реактивной атмосферы были обнаружены также в покрытиях хрома, полученных электронно-плазменным напылением в смесях кислород-азот и кислород-аргон [8,9].

Другим типом трибологических покрытий, перспективным с точки зрения их использования в тяжело нагруженных узлах трения являются алмазоподобные углеродные покрытия. Эти покрытия характеризуются уникальным для твердых трибологических покрытий сочетанием функциональных характеристик. Для них характерны высокие твердость, упругие свойства и износостойкость, которые сочетаются у них с низкими значениями коэффициента трения, высокой трещиностойкостью и химической инертностью [10-12]. При этом основные физико-механические и трибологические характеристики покрытий данного типа можно варьировать путём направленного выбора технологии их нанесения или с помощью легирования различными элементами. Так, в зависимости от сочетания указанных факторов, установившиеся значения коэффициента трения могут составлять от 0,001 до 0,7 [10, 13].

Углерод в покрытиях этого типа находится в аморфном (алмазоподобном) состоянии, которое представляет собой смесь локальных областей, содержащих преимущественно sp^2 - или sp^3 -гибридизированные атомы углерода. Алмазоподобные углеродные покрытия, получают вакуумными ионно-плазменными методами, начиная с середины 1950-х гг. В ИМАШ РАН работы в области трибологии и функциональных свойств алмазоподобных покрытий были начаты в конце 2000-х гг. по инициативе А.П. Семенова, который позднее привлек к ним автора и его сотрудников.

Основываясь на уже имевшихся данных о структуре и свойствах нанокompозитных покрытий, полученных реактивным электронно-плазменным напылением в среде углеродсодержащих газов [3, 4], можно было предположить, что, контролируя содержание такого газа в реактивной атмосфере, удастся получить покрытия с включениями алмазоподобной углеродной фазы, обладающие высокими механическими, противоизносными и антифрикционными характеристиками.

Учитывая сказанное, для исследования были выбраны алмазоподобные покрытия системы хром-углерод. Покрытия получали методом реактивного магнетронного распыления хрома в смеси $Ar+C_2H_2+N_2$ при различных содержаниях азота и ацетилена [14]. Аморфная углеводородная фаза в этих покрытиях, согласно данным комбинационного рассеяния, имела алмазоподобную неупорядоченную структуру. Полученные покрытия были нанокompозитными. Помимо аморфного углерода они содержали включения металлического хрома и его карбидных и нитридных фаз нанометрового размера (~8-13 нм

для хрома и ~1,5-3 нм – для фаз внедрения). Было показано, что размер структурных составляющих определялся отношением объемных долей ацетилена и азота в смеси реактивных газов, используемой при получении покрытий, структура которых представляла собой углеводородную матрицу, армированную хаотически распределенными в ней металлическими и неметаллическими включениями [14]. При этом увеличение размера ОКР хрома, а также добавление к карбидной фазе включений нитрида хрома повышало механические свойства покрытий. Модель нанокompозитной структуры алмазоподобных покрытий, легированных хромом, основанная на имеющихся данных была предложена в работе [15].

Результаты трибологические испытания покрытий $a\text{-C:H:Cr:N}$, полученных магнетронным распылением, позволяют сделать вывод о достаточно высоком уровне износостойкости и антифрикционных свойств [14]. В то же время характер влияния особенностей нанокompозитной структуры на трибологическое поведение оказался более сложным, чем для механических свойств. Число циклов, при котором возникала нестабильность силы трения, характеризующее работоспособность легированных хромом алмазоподобных покрытий в условиях фрикционной усталости, значительно снижалось с уменьшением содержания C_2H_2 в смеси ацетилен-азот. Одновременно с этим существенно улучшались антифрикционные свойства, а коэффициент трения f снижался до уровня ниже 0,1. При дальнейшем анализе было установлено, что работоспособность была выше у покрытий с малым размером хромовых включений. В покрытиях, полученных в смесях с высоким содержанием азота, у которых размер области когерентного рассеяния (ОКР) хрома был выше, работоспособность снижалась по мере его увеличения. Зависимость нанотвердости покрытий $a\text{-C:H:Cr:N}$ от размеров ОКР хрома может быть описана обратным соотношением Холла-Петча, что свидетельствует о происходящем при уменьшении характерных размеров неоднородностей структуры разупрочнении.

Особенности структурно-фазового состояния и его влияния на трибологические свойства вакуумных ионно-плазменных нанокompозитных покрытий молибдена, вольфрама, титана и кремния, содержащих алмазоподобный углерод, исследовали также в работах [16-19]. В случае покрытий, легированных титаном было показано, что в них, также как в покрытиях, легированных хромом, зависимость нанотвердости от среднего размера структурной

неоднородности следует обратному соотношению Холла-Петча [20].

Наряду с легированными алмазоподобными покрытиями были исследованы металл-углеродные покрытия с другим типом нанокompозитной структуры – хромуглеродные покрытия, полученные магнетронным распылением мишеней на основе хрома и наноалмазов детонационного синтеза [21].

Нанокompозитная структура таких покрытий представляет собой смесь из областей со структурой металлического хрома, фаз внедрения на его основе, а также отдельных изолированных включений свободного углерода микрометрового размера с графитоподобной структурой на основе углеродных фаз, имеющих различную степень графитизации [22]. Хромуглеродные покрытия этого типа имеют матрицу с большим содержанием хрома, отдельные зерна которой образованы из связанных ориентационными соотношениями микрообластей (субзерен) хрома и его фаз внедрения. Такая структура характерна для многих двухфазных вакуумных ионно-плазменных покрытий [23].

Было высказано предположение [24], что частицы углерода с меняющейся в широких пределах степенью графитизации могут играть в покрытиях этого типа роль твердой смазки, слой которой, образовавшийся в процессе трения, будет защищать поверхность покрытия и предотвращать его катастрофический износ.

Зависимость нанотвердости хромуглеродных покрытий этого типа от размеров ОКР хрома и его фаз следует Холлу-Петчу, что свидетельствует о происходящем при уменьшении характерного размера субзерен структурном упрочнении и, возможно, связано с различиями в структурно-фазовом состоянии этих и легированных хромом алмазоподобных покрытий, а также различным содержанием, структурным состоянием и ролью углеродной фазы в процессах пластической деформации металл-углеродных покрытий разных типов. Сравнительному анализу особенностей структуры и функционального поведения двух типов хромуглеродных нанокompозитных покрытий посвящена работа [24].

Заключение

Исследования структуры и трибологических свойств покрытий, получаемых вакуумными ионно-плазменными методами, показали, что многие такие покрытия, представляющие интерес с практической точки зрения, являются многофазными и обладают сложной микроструктурой. В этой связи в ИМАШ РАН ведутся работы по трибологическому материаловедению подобных покрытий, начало

которым было положено исследованиями А.П. Семёнова (1922-2019) и его сотрудников.

Изучались нанокompозитные трибологические покрытия как «традиционного» типа на основе тугоплавких соединений, так и алмазоподобные углеродные покрытия, полученные при легировании карбидообразующими элементами и другие твердые металл-углеродные покрытия с нанокompозитной структурой.

В процессе исследований структуры, функциональных и трибологических характеристик таких покрытий было установлено, что их структурно-фазовое состояние может существенно влиять на их работоспособность и поведение при трении и износе. При этом относительно небольшие изменения структуры и фазового состава могут оказывать заметный эффект на поведение функциональных свойств.

Особый интерес при изучении нанокompозитных покрытий, полученных вакуумными ионно-плазменными методами, представляют вопросы, связанные с образованием в процессе синтеза покрытий углеродных фаз и твердых углеводородных конденсатов и их возможной ролью в процессах трения и износа.

Результаты выполненных исследований показывают, что свойства нанокompозитных трибологических покрытий, в том числе алмазоподобных и содержащих различные модификации свободного углерода, можно контролировать, меняя их микроструктуру и структурно-фазовое состояние путем подбора параметров процесса вакуумного ионно-плазменного напыления.

[1] Никитин М.М. Вакуумный анодный разряд как источник ионизованных потоков материала покрытия // Изв. РАН. Сер. физич. 2010. Т. 74, № 2, С. 306-312.

[2] Хрущов М.М., Сорокко А.А., Семёнов А.П. Об особенностях фазового состава титановых и хромовых покрытий, получаемых реактивным напылением в среде активных газов // Металлы. 2007. № 3. С. 85-93.

[3] Хрущов М.М., Семёнов А.П., Сорокко А.А. Фазовый состав, микроструктура и трибологические свойства электронно-плазменных покрытий на основе титана, полученных в смесях активных газов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 9. С. 20-25.

[4] Хрущов М.М., Семёнов А.П. Фазовый состав, микроструктура и трибологические свойства электронно-плазменных покрытий на основе хрома // Трение и износ. 2013. Т.34. № 1. С.72-81.

[5] Хрущов М.М. К оценке степени неравновесности структуры триботехнических покрытий, полученных вакуумным ионно-плазменным напылением // Трение и износ. 2006. Т. 26. № 5. С. 502-506.

[6] Семёнов А.П., Сорокко А.А., Хрущов М.М. Влияние режимов нанесения реактивным электронно-плазменным методом покрытий системы Cr-O на их состав, механические и трибологические свойства // Трение и износ. 1990. Т.11. № 6. С. 1094-1102.

[7] Хрущов М.М., Сорокко А.А., Семёнов А.П. Структурные особенности покрытий системы Cr-O, полученных реактивным осаждением в парах металла // Поверхность. 1991. № 5. С. 97-106.

[8] Хрущов М.М., Сорокко А.А. Состав активной атмосферы и особенности структурных и трибологических характеристик реактивных электронно-плазменных покрытий системы хром-кислород // Трение и износ. 1994. Т.15. № 5. С. 830-837.

[9] Хрущов М.М. Структурные характеристики и триботехнические свойства покрытий хрома, полученных реактивным напылением в кислородосодержащих смесях // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 1. С. 11-18.

[10] Erdemir A., Donnet C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects // J. Phys. D. 2006. V. 39, P. R311-R327.

[11] Семёнов А.П. Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 1. С. 83-102.

[12] Семёнов А.П., Хрущов М.М. Влияние внешней среды и температуры на трибологические свойства алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 1. С. 195-217.

[13] Tyagi A., Walia R.S., Qasim M., et al. A critical review of diamond-like carbon coatings for wear resistance applications // Int. J. Refr. Met. Hard Mater. 2019. V. 78. P. 107-122.

[14] Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А. и др. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия a-C:H:Cr – структурное состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН: Сер. физич. 2014. Т. 78. № 10. С. 1257-1265.

[15] Хрущов М.М., Марченко Е.А., Левин И.С. и др. Особенности структуры и трибологическое поведение хромуглеродных покрытий, полученных магнетронным распылением // Физ. мет. металловед. 2019. Т. 120. № 2. С. 219-224.

[16] Левин И.С., Хрущов М.М., Марченко Е.А. и др. Влияние легирования на структуру и особенности трибологического поведения вакуумных алмазоподобных покрытий // Вестник Московского ун-та. Сер. 3: Физика. 2016. № 2. С. 46-52.

[17] Khrushchov M., Levin I., Marchenko E. et al. Effect of structure and deposition technology on tribological properties of DLC coatings alloyed with VI A group metals // J. Phys.: Conf. Series. 2016. V. 729. 012016.

[18] Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Levin I.S. et al. Structure and tribological behavior of titanium-based coatings deposited by reactive magnetron sputtering // J. Phys.: Conf. Series. 2019. V. 1313. 012028.

[19] Авдюхина В.М., Хрущов М.М., Левин И.С. и др. Структурные особенности и функциональное поведение вакуумных покрытий, полученных реактивным магнетронным распылением кремния // Ученые записки физич. ф-та Московского ун-та. 2020. № 4. 2040701.

[20] Авдюхина В.М., Хрущов М.М., Левин И.С. и др. Структурно-фазовые и функциональные характеристики титановых покрытий, полученных реактивным магнетронным распылением // Ученые записки физич. ф-та Московского ун-та. 2019. № 3. 1930701.

[21] Хрущов М.М., Атаманов М.В., Шевченко Н.В. и др. Хромуглеродные покрытия на основе хрома и детонационных наноалмазов: Получение методом магнетронного распыления, особенности фазового состава и трибологические свойства // Пробл. машиностр. и надежн. машин. 2018. № 2. С. 44-53.

[22] Хрущов М.М., Марченко Е.А., Левин И.С. и др. Структура и функциональные свойства покрытий, полученных распылением мишеней на основе хрома и наноалмазов детонационного синтеза // Металлы. 2020. № 4. С. 85-92.

[23] Hibbs M.K., Sundgren J.-E., Johansson B.O. et al. The microstructure of reactively sputtered Ti-N films containing the Ti2N phase // Acta Met. 1985. V. 33. № 5. P. 797-803.

[24] Хрущов М.М. Хромуглеродные покрытия с различным типом нанокompозитной структуры, полученные магнетронным распылением, и их свойства // Трение и износ. 2022. Т. 43. № 1. С. 59-77.

ВЛИЯНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕРОВНОСТЕЙ НА ФАКТИЧЕСКУЮ ОБЛАСТЬ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ УПРУГИХ ТЕЛ

Цуканов И.Ю.

E-mail: ivan.yu.tsukanov@gmail.com

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

На основе решения контактной задачи для периодического микрорельефа, описанного рядом Фурье, исследовано влияние мелкомасштабных составляющих неровностей на фактическую область контакта поверхностей упругих тел. Полученные аналитические выражения для расчета контактного давления и длины фактической области контакта позволили установить различие вклада мелкомасштабных составляющих неровностей с четными и нечетными частотами гармоник.

Ключевые слова: упругий контакт, многоуровневая шероховатость, периодический рельеф, фактическая область контакта.

Введение

Широкое применение мягких резиноподобных упругих материалов во многих областях техники и медицины способствует развитию теории контактного и фрикционного взаимодействия тел, одно из которых изготовлено из материала с низким модулем упругости. Поверхность такого тела при взаимодействии с шероховатой поверхностью контртела может существенно деформироваться, а площадь фактического контакта может приближаться к номинальной площади контакта. В таких условиях важным является описание неровностей поверхности, так как контакт будет осуществляться не только между отдельными вершинами, но и с учетом других геометрических параметров неровностей. При этом ключевую роль будет играть многоуровневая геометрическая структура поверхности. Одной из первых работ в данном направлении была работа В.Н. Марочкина [1], обратившего внимание на зависимость геометрических параметров неровностей, в частности радиуса кривизны при вершине, от степени приближения (увеличения), неразрывно связанной с понятием базовой длины (площади) при измерении неровностей поверхности – волнистости и шероховатости. Следует, однако, отметить, что при моделировании контакта «мягких» упругих тел необходимо учитывать профиль неровности на разных масштабных уровнях.

INFLUENCE OF SMALL-SCALE COMPONENTS OF ASPERITIES ON THE REAL AREA OF CONTACT OF THE SURFACES OF ELASTIC BODIES

Tsukanov I.Yu.

Based on the solution of the contact problem for a periodic microrelief described by the Fourier series, the influence of small-scale components of asperities on the real contact area of the surfaces of elastic bodies is studied. The obtained analytical expressions for calculating the contact pressure and the length of the real contact zone made it possible to establish the difference in the contribution of small-scale components of asperities with even and odd frequencies.

Keywords: elastic contact, multiscale roughness, periodic relief, real contact area.

Неровности поверхности, полученные лезвийными, отделочно-упрочняющими методами, а также элементы искусственной текстуры имеют в основном регулярную структуру. Наиболее часто при моделировании текстуры таких поверхностей используют ряд Фурье, например, функцию Вейерштрасса с конечным числом слагаемых [2]. Численное моделирование методом конечных элементов, проведенное в работе [2], показало неоднозначное скачкообразное поведение кривой фактической области контакта с ростом нагрузки при добавлении неровностей более «мелких» масштабных уровней. Подобные результаты также были получены в работе [3] для профиля, представляющего собой сумму синусоид с различными амплитудами, частотами и фазами. Численное модулирование позволило получить новые результаты, показывающие значительное влияние мелкомасштабных составляющих неровностей на контактное взаимодействие упругих тел, однако детальный анализ данного эффекта в настоящее время не проводился.

В данной работе на основе аналитических методов механики контактного взаимодействия проанализировано влияние мелкомасштабных составляющих неровностей в рамках допущения об односвязности области контакта.

Постановка задачи и допущения

Рассматривается контакт двух линейно упругих тел в рамках аппроксимации их полуплоскостями. Упругие свойства контактирующих тел характеризуются приведенным модулем упругости E^* :

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (1)$$

где E_1, E_2 и ν_1, ν_2 – модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих тел, соответственно. Схема контакта для двухуровневой регулярно шероховатой поверхности и упругой полуплоскости изображена на рис. 1.

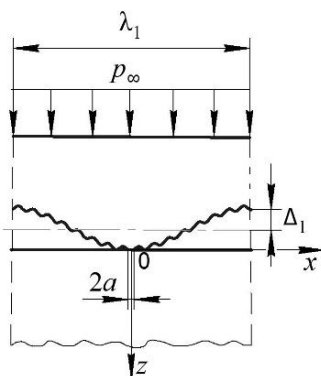


Рис. 1. Схема контакта двухуровневой шероховатой поверхности и упругой полуплоскости

Рассматриваемая задача является периодической; предполагается бесконечное число зон контакта. Схема, показанная на рис. 1, иллюстрирует контакт тел на одном периоде. К контактирующим поверхностям приложено номинальное давление p_∞ . В качестве допущения примем, что контакт реализуется на одном отрезке $[-a; a]$ внутри периода. Это позволяет использовать

Контактные задачи рассматриваются в рамках гипотезы плоского деформированного состояния. Влиянием сил трения на распределение нормальных давлений пренебрегается.

Не теряя общности задачи, примем, что функция формы поверхности состоит только из двух членов ряда Фурье:

$$f(x) = \Delta_1 \cos n_1 x + \Delta_2 \cos n_2 x, \quad (2)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, n_1, n_2$ – амплитуды и частоты первой и второй гармоники соответственно, $\Delta_1 \ll \Delta_2$; $n = 2\pi/\lambda$. Для простоты записи примем, что $\Delta_1 = 1, n_1 = 1, \lambda_1 = 2\pi$.

Основное уравнение периодической контактной задачи имеет вид:

$$\frac{E^*}{2} \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \frac{1}{2\pi} \int_{-a}^a p(\xi) \operatorname{ctg} \frac{x-\xi}{2} d\xi. \quad (3)$$

В интегральном уравнении (3) функция зазора внутри отрезка контакта $x \in [-a, a]$ определяется условием контакта:

$$h(x) = \delta - (1 - \cos x + \Delta_2 (1 - \cos nx)), \quad (4)$$

где δ – величина сближения тел.

Так как область контакта не известна заранее, замыкает систему уравнений (3) и (4) уравнение равновесия

$$p_\infty = \frac{1}{2\pi} \int_{-a}^a p(x) dx. \quad (5)$$

Результаты и обсуждение

Общее решение уравнений (3-5) было получено с применением резольвенты интегрального уравнения (3), предложенной Л.И. Чибриковой [4] и сведению решения к неполному преобразованию Абеля [5]. Распределение контактного давления для i -й гармоники функции формы поверхностной текстуры с амплитудой Δ_i и частотой n_i при $\lambda_1 = 2\pi$ имеет вид

$$p_i(x) = \frac{\Delta_i n_i^2 E^*}{2\sqrt{2}} \left| \cos \frac{x}{2} \int_x^a \frac{\sin \xi P_{n-1}^{0,1}(\cos \xi) d\xi}{\sqrt{\cos x - \cos \xi}} \right|, \quad (6)$$

где $P_n^{(\alpha, \beta)}(x)$ – многочлен Якоби.

Номинальное давление для i -й гармоники при этом определяется как:

$$p_{\infty i}(x) = -\frac{\Delta_i n_i E^*}{2} P_n^{-1,0}(\cos a), \quad (7)$$

В отличие от работы [6] и исследований численными методами [2, 3] полученные выражения позволяют определять контактные характеристики во всем диапазоне приложенных номинальных давлений, в том числе при почти полном контакте.

На рис. 2 показаны графики влияния гармоник неровностей с различными частотами и одинаковой амплитудой ($\Delta = 1$) на связь полудлины области контакта a с номинальным давлением p_∞ . Рис. 2 показывает, что частота осцилляций значений полудлины контакта слабо зависит от номинального давления. При наличии в спектре текстуры поверхностей низких частот контактные характеристики будут непрерывно меняться с ростом номинального давления, так как амплитуда их колебаний мала. Более высокие частоты гармоник с повышением их амплитуд дают осциллирующее поведение контактных характеристик [6]. При приближении к полному контакту влияние высокочастотных (мелкомасштабных) составляющих неровностей резко возрастает. Причем для нечетных гармоник номинальное давление, необходимое для

дальнейшего сжатия тел резко возрастает, а для четных, наоборот, снижается. Это позволяет объяснить эффект сильной асимметрии кривой «номинальное давление – фактическая длина контакта» для волнистых текстур с несинусоидальной геометрией [7]. Кроме того, учитывая данный эффект, можно создавать текстуры, для которых режим полного контакта наступает при меньших номинальных давлениях, а, следовательно, такие текстуры будут обладать лучшими адгезионными свойствами при нормальном отрыве.

В качестве примера рассмотрим две двухуровневые регулярно шероховатые поверхности (согласно выражению (2)), показанные на рис. 3. Профили отличаются частотой второй гармоники.

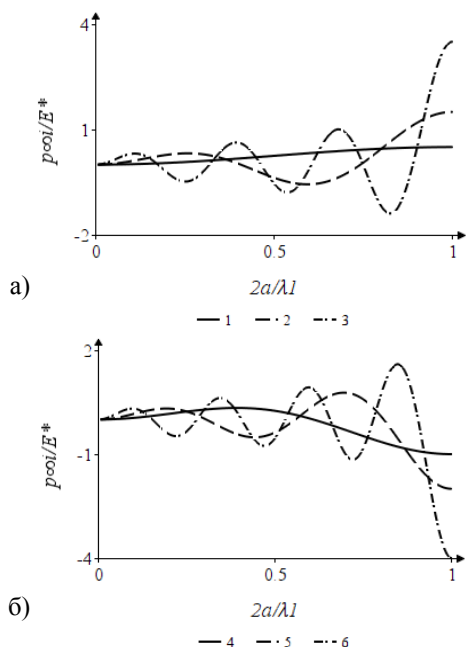


Рис. 2. Влияние гармоник неровностей с различными частотами на связь полудлины области контакта с номинальным давлением: а – нечетные значения частоты; б – четные значения частоты; 1 – $n = 1$; 2 – $n = 3$; 3 – $n = 7$; 4 – $n = 2$; 5 – $n = 4$; 6 – $n = 8$

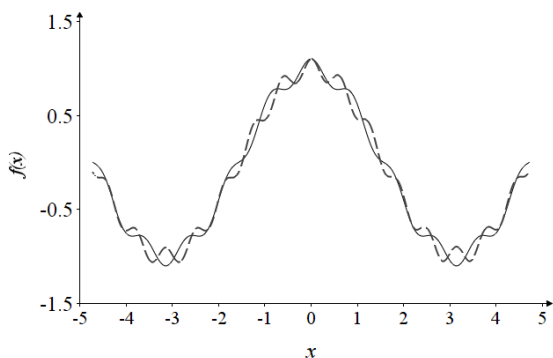


Рис. 3. Двухуровневые регулярно-шероховатые поверхности при $\Delta_1 = 1$; $\Delta_2 = 0.1$; $n_1 = 1$; $n_2 = 7$ (сплошная линия) и $n_2 = 10$ (штриховая линия)

Для поверхностей, изображенных на рис. 3, были построены графики зависимости фактической длины контакта от номинального давления (рис. 4).

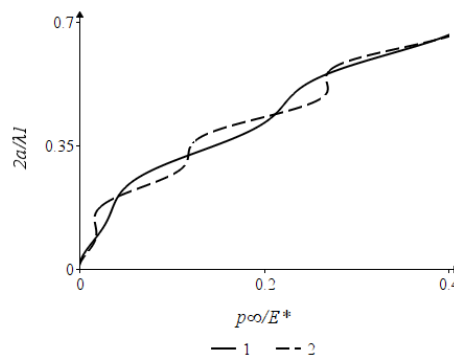


Рис. 4. Зависимость длины области фактического контакта для двухуровневых регулярно-шероховатых поверхностей от номинального давления при $\Delta_1 = 1$; $\Delta_2 = 0.03$; $n_1 = 1$; $n_2 = 7$ (1) и $n_2 = 10$ (2)

Из рис. 4 видно, что с ростом частоты гармоники второго уровня поведение кривой длины фактической области контакта от номинального давления становится более немонотонным и стремится к скачкообразному, что характерно для перехода от одной области контакта к дискретным пятнам.

Заключение

Полученные общие зависимости для расчета контактных характеристик при взаимодействии поверхностей со сложным и многоуровневым рельефом позволяют выбирать рациональные геометрические характеристики микрорельефа для управления его адгезионными и фрикционными свойствами в контакте тел, изготовленных из мягких упругих материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00400.

[1] Марочкин В.Н. Исследование геометрии поверхностей. Вопросы трения и проблемы смазки. - М.: Наука, 1968. – С. 161-172.
 [2] Paggi M., Reinoso J.A. variational approach with embedded roughness for adhesive contact problems // Mechanics of Advanced Materials and Structures – 2018 – Т. 2018. – С. 1-17.
 [3] Manners W. Methods for analysing partial contact between surfaces // Int. J. Mech. Sci. – Т. 45 – №. 6-7. – С. 1181–1199.
 [4] Чибрикова Л.И. О решении некоторых полных сингулярных интегральных уравнений // Учен. зап. Казан. ун-та. – 1962 – Т. 122. – кн. 3. – С. 95-124.
 [5] Barber J.R. Contact Mechanics. - Cham: Springer International Publishing, 2018. – 592 с.
 [6] Цуканов И.Ю. Периодическая контактная задача для поверхности с двухуровневой волнистостью // Прикладная математика и механика. – Т.82. – № 3. – С. 372-380.
 [7] Tsukanov I.Y. Effects of shape and scale in mechanics of elastic interaction of regular wavy surfaces // Proc. Inst. Mech. Eng., Part J – 2017. – Т. – 231. – № 3. – С. 332-340.

ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛЯНЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Шолом А.В. *, Пилюгин С.М., Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г.

*E-mail: asholom@mail.ru

Технопарк «ХТЦ УАИ-РОСОЙЛ», г. Уфа, Россия.

Представлены результаты исследований по определению охлаждающих характеристик минеральных масел, которые применяются в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей на различных операциях металлообработки. Выявлены зависимости влияния кинематической вязкости минеральных масел на их охлаждающие и триботехнические свойства.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, охлаждающие характеристики, максимальная скорость охлаждения, триботехнические свойства.

Введение

Постоянное развитие технологий металлообработки и создание нового высокопроизводительного оборудования ставит перед технологами производств задачу применения наиболее эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Поэтому современные СОЖ представляют из себя сложные, строго сбалансированные, композиции базовой основы и функциональных присадок, обеспечивающих: снижение трения на контактных поверхностях; износа металлообрабатываемого инструмента; фрикционного и деформационного разогрева инструмента и заготовки; исключения коррозионного поражения деталей и оборудования; минимизацию биопоражения. При этом они должны быть безопасны для персонала и окружающей среды и легко утилизироваться.

Основные функции СОЖ это смазка и охлаждение инструмента и заготовки в процессе металлообработки, от которых в основном зависит качество обработанной поверхности и стойкость металлообрабатываемого инструмента.

Масляные СОЖ применяются на низкоскоростных операциях обработки металлов (глубокое сверление, нарезка резьбы, холодная объемная штамповка и др.), где требуется максимально снизить трение между инструментом и заготовкой. Триботехнические свойства масляных СОЖ довольно хорошо определяются по стандартным методикам испытаний.

INFLUENCE OF THE COOLING CHARACTERISTICS OF OIL COOLANTS ON THEIR TRIBOTECHNICAL PROPERTIES

Sholom A.V., Pilyugin S.M., Abramov A.N., Tyulenev D.G.

The results of studies on determining the cooling characteristics of mineral oils, which are used as cutting fluids in various metalworking operations, are presented. Dependences of the influence of the kinematic viscosity of mineral oils on their cooling and tribotechnical properties are revealed.

Keywords: cutting fluid, cooling characteristics, maximum cooling rate, tribotechnical properties.

Охлаждающие свойства СОЖ оказывают влияние на снижение температуры инструмента и обрабатываемого материала. Снижение температуры в зоне обработки повышает точность получаемых размеров детали за счет уменьшения температурных деформаций, увеличивает стойкость инструмента, оказывает влияние на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое [1-3].

В настоящее время нет общепризнанной теории, объясняющей многочисленные аспекты механизма действия СОЖ, в том числе и из-за отсутствия данных по зависимости между охлаждающими и триботехническими характеристиками смазочно-охлаждающих жидкостей. Поэтому исследования взаимосвязи их характеристик и создание методов инструментального контроля СОЖ являются актуальной задачей.

Цель исследования

Целью исследования является определение влияния охлаждающих характеристик масляных СОЖ на их триботехнические характеристики и, как следствие, на срок службы инструмента и качество обработанной поверхности.

Материалы и методы

Для определения охлаждающих характеристик технологических жидкостей в лабораториях Технопарка ХТЦ УАИ - РОСОЙЛ была создана установка предназначенная для определения охлаждающих характеристик технологических жидкостей (УЗС-2). Основные технические

характеристики установки соответствуют требованиям международных стандартов ISO 9950 (1999 г.), ASTM D6200-01 (2017 г.) и ASTM D6482-06 (2016 г.) [4-8].

На рис. 1 показан общий вид установки (а) и схема установки с механизмом переноса термодатчика в емкость с технологической жидкостью (б).

Цилиндрический образец – термодатчик (8) из никелевого сплава, имеющий термопару в своем геометрическом центре, нагревается в печи (2) до определенной температуры и затем переносится в фиксированный объем испытуемой жидкости.

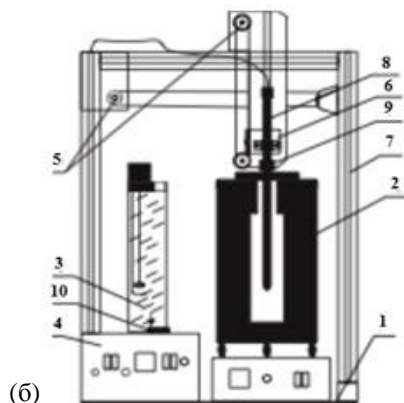


Рис. 1. Внешний вид установки (а) для определения охлаждающих характеристик технологических и закалочных жидкостей и схема установки с механизмом переноса термодатчика (б)

- 1 – основание; 2 – печь; 3 – ёмкость с подогревом и перемешивающим устройством; 4 – блок управления; 5 – шаговые двигатели; 6 – держатель термодатчика; 7 – П-образная вертикальная стойка; 8 – термодатчик; 9 – втулка-заглушка; 10 – направляющие

Нагрев термодатчика осуществляется в трубчатой электропечи (2). Перенос термодатчика из печи в термостатированный (3) или другой сосуд с пробой исследуемой технологической среды производится автоматически с помощью механизма переноса. Проба тестируемой среды может испытываться с помощью перемешивающего устройства с подогревом, либо, при испытании масел, без перемешивания в специальном стакане.

Исследование с помощью данной установки охлаждающего действия различных СОЖ позволяет осуществить выбор СОЖ с наиболее приемлемой охлаждающей способностью в заданном температурном диапазоне.

Результаты и обсуждение

Для исследования охлаждающих характеристик наиболее распространенных минеральных масел, которые используются в качестве СОЖ в процессах металлообработки, были выбраны:

- масла индустриальные И-5А, И-12А, И-20А, И-40А по ГОСТ 20799-88;
- масло компрессорное из сернистых нефтей КС-19 ГОСТ 9243-75;
- высоковязкое остаточное масло из сернистых нефтей селективной очистки П-40 (ТУ 38101312-78).

Из полученных экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, можно заметить, что с увеличением кинематической вязкости и плотности исследуемых минеральных масел увеличивается температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения инструмента и заготовки, а также уменьшаются время охлаждения до 600 °С и скорость охлаждения при 300 °С.

В тоже время, изменение кинематической вязкости масел не оказывает существенного влияния на величину максимальной скорости охлаждения.

В табл. 1 приведены средние значения охлаждающих характеристик исследуемых масел, которые получены из 5 опытов.

На рис. 2 показаны зависимости «температура-время», «температура-скорость» для различных масел, полученные на УЗС-2.

Табл. 1. Охлаждающие характеристики исследуемых масляных СОЖ

Тестируемая СОЖ	Плотность при 20 °С, кг/м	Кинематическая вязкость (ν) при 40 °С, сСт	Время охлаждения до 600°С, сек	Скорость охлаждения при 300°С, °С/сек	Максимальная скорость, °С/сек	Температура при максимальной скорости, °С
И-5А	870	7	6,73	6,16	68,09	541,67
И-12А	880	14	6,32	5,92	71,73	567,54
И-20А	890	30	6,18	5,83	67,40	592,33
И-40А	900	65	5,35	5,77	78,42	616,80
КС-19	905	225	4,94	5,00	77,82	691,54
П-40	908	780	4,84	4,31	70,60	715,24

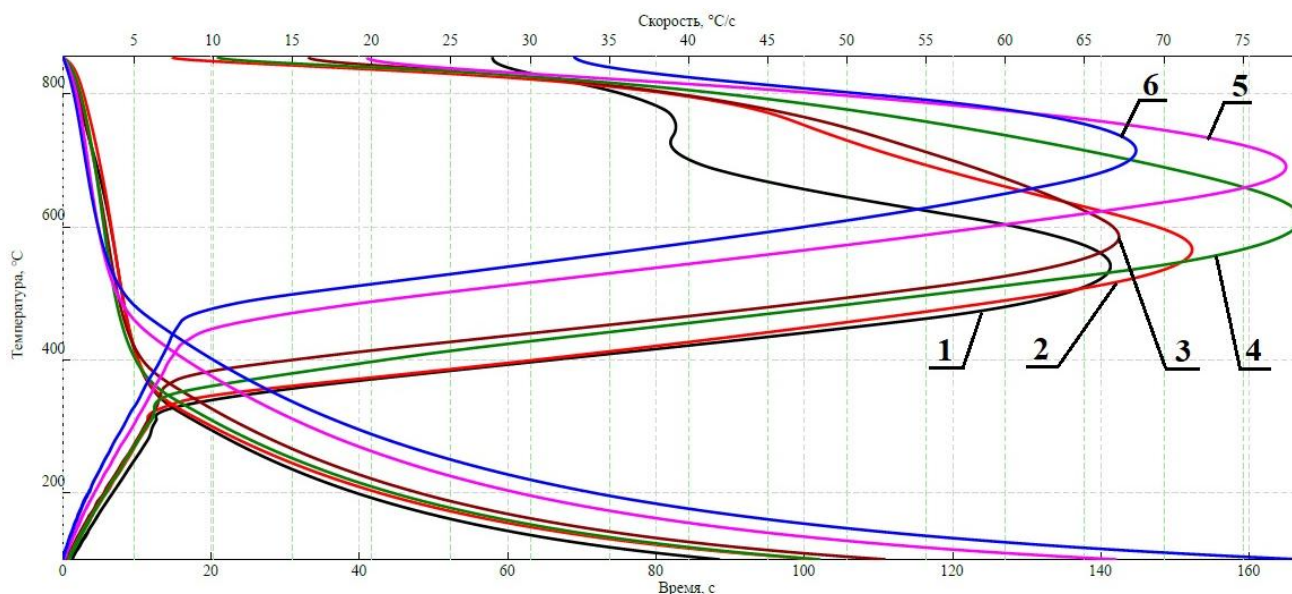


Рис. 2. Зависимости «температура-время», «температура-скорость» для различных масел:
 1 – И-5А, 2 – И-12А, 3 – И-20А, 4 – И-40А, 5 – КС-19, 6 – П-40

Максимальные скорости охлаждения всех масел различаются друг от друга незначительно. Но температуры при максимальной скорости охлаждения существенно различаются и прослеживается определенная зависимость. См. табл. 1.

На рис. 3 показана зависимость температуры, при которой обеспечивается максимальная

скорость охлаждения, от кинематической вязкости масел.

Кривая аппроксимирована степенной функцией по формуле:

$$y = 481,2439x^{0,0618}. \quad (1)$$

где y – температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения;
 x – кинематическая вязкость испытываемых масел.

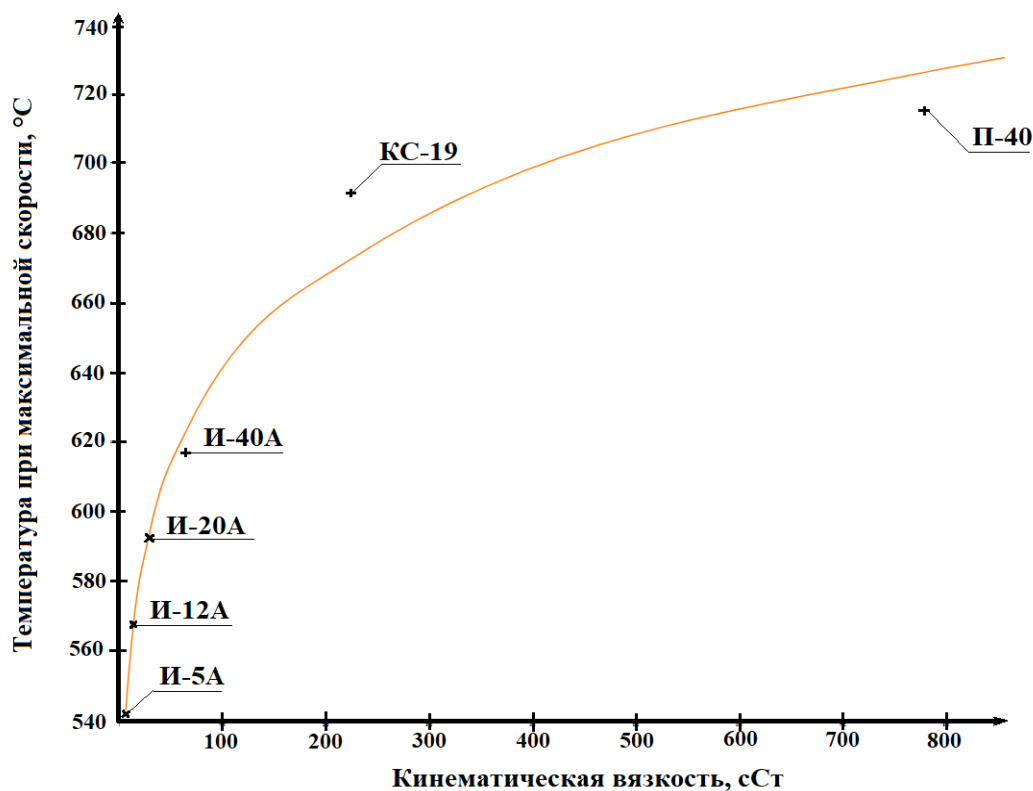


Рис. 3. Зависимость температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения, от кинематической вязкости масел

Триботехнические свойства вышеперечисленных масляных СОЖ, полученные на четырехшариковой машине трения (ЧМТ-1), приведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты триботехнических испытаний

СОЖ	Pc	Ди (40)
И-5А	119	1,48
И-12А	119	1,59
И-20А	126	0,89
И-40А	150	0,90
КС-19	168	0,73
П-40	168	0,67

Из полученных данных можно сделать вывод, что увеличение вязкости повышает нагрузку сваривания и улучшает противоизносные свойства масел.

Отсюда хорошо просматривается взаимосвязь температуры, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения и триботехнических характеристик.

Заключение

Предложено определять охлаждающие характеристики СОЖ, применяемых в процессах металлообработки, с помощью установки для оценки охлаждающих характеристик закалочных сред.

Показано, что с увеличением кинематической вязкости и плотности исследуемых минеральных масел увеличивается температура, при которой обеспечивается максимальная скорость охлаждения инструмента и заготовки, а также уменьшаются время охлаждения до 600 °С и скорость охлаждения при 300 °С.

Рекомендуется подбор определенной СОЖ, для операций металлообработки с охлаждением, производить опираясь на данные получаемые с помощью УЗС-2.

Была выявлена зависимость охлаждающих характеристик от триботехнических свойств испытуемых СОЖ. С повышением плотности и кинематической вязкости СОЖ, растет температура при максимальной скорости охлаждения и повышаются триботехнические характеристики.

[1] Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / под ред. А.В. Чичинадзе, М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

[2] Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под общей ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1986, – 352 с.

[3] Бердичевский У.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов. Справочник. – М.: Машиностроение, 1984, – 224 с.

[4] Шолом В.Ю., Абрамов А.Н., Казаков А.М., Шолом А.В., Иванов В.В. Установка для определения охлаждающих характеристик технологических сред // КШП ОМД. 2014. – № 5. – С. 30-33.

[5] Патент РФ № 2699698. Установка для определения охлаждающей способности технологической среды / Шолом А.В., Поляков А.Б., Тюленев Д.Г., Иванов В.В., Волкова Е.Б., № 2018125812; заявл. 12.07.2018; опубл. 09.09.2019, Бюл. № 25.

[6] ISO 9950:1995(E). Industrial quenching oils Determination of cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method. - Geneva: International Organization for Standardization, 1995. – 9 с.

[7] ASTM D6482 - 06(2016) Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curve Analysis with Agitation (Tensi Method), 2016. – 9 с.

[8] ASTM D6200 - 01(2017) Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, 2017. – 6 с.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И ОКСИДОКЕРАМИКИ, ДОПИРОВАННЫХ ФУЛЛЕРЕНАМИ

Шпилевский Э.М.* , Филатов С.А.

*E-mail: eshpiltvsky@rambler.ru

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь.

Показано, что введение фуллеренов в металлы (Ti, Ni) и оксидокерамику (Al_2O_3) в небольших долях существенно (в некоторых случаях в разы) изменяют их трибологические свойства. Повышение долевого содержания фуллереновых молекул выше 2,0 мас.% в материалах оказывается менее эффективным, чем в случае малых добавок. Приведены примеры применения покрытий на основе фуллеренсодержащих металлических и оксидокерамических пленок.

Ключевые слова: трибологические свойства, фуллеренсодержащие пленки, металлические и оксидокерамические покрытия, фуллерены.

Введение

В последнее десятилетие в научной литературе уделяется много внимания проблеме создания фуллеренсодержащих материалов на основе различных матриц: металлов, полимеров, керамик. Фуллерены обладают электроноакцепторными свойствами, за счет которых с молекулярными соединениями образуют нековалентные соединения донорно-акцепторного типа. Свою способность образовывать комплексы они сохраняет при взаимодействии с веществами различного строения и структурной организации [1-3].

Целью практически всех исследований является соединение уникальных свойств фуллерена C_{60} с полезными свойствами широко используемых веществ и материалов, чтобы суммарно превзойти их полезные характеристики [3-5].

В настоящей работе исследованы трибологические свойства легированных фуллеренами металлов (Ti, Ni) и оксидокерамики (Al_2O_3). Выявлено влияние доли молекул C_{60} на коэффициенты трения и объемный износ.

Материалы и методы

Легирование металлов осуществлялось испарением и совместной конденсацией в вакууме металла и фуллерита C_{60} , а Al_2O_3 – методом полива насыщенным раствором C_{60} в толуоле.

Измерение коэффициента трения производилось на трибологической установке с

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF METALS AND OXYDOCERAMICS DOPED WITH FULLERENES

Shpilevsky E.M., Filatov S.A.

It is shown that the introduction of fullerenes into metals (Ti, Ni) and oxide ceramic (Al_2O_3) in small fractions significantly (in some cases by several times) changes their tribological properties. Increasing the proportion of fullerene molecules above 2,0 wt.% in materials is less effective than in the case of small additives. Examples of the application of coatings based on fullerene-containing metal and oxide-ceramic films are given.

Keywords: tribological properties, fullerene-containing films, metal and oxide-ceramic coatings, fullerenes.

вращающимся горизонтальным диском, на который устанавливался плоский образец. Сопряженным телом служил штифт цилиндрической формы диаметром 2,5 мм с закругленным титановым основанием. Использовались скорости вращения диска от 50 до 400 об/мин при диаметре треков 12...14 мм. Сила трения измерялась по отклонению рычага датчиком Холла. Исследовались зависимости коэффициента трения и объемного износа для пар трения: (Ti- C_{60})-титан, (Ni- C_{60})-титан, (Al_2O_3 - C_{60})-титан с разным содержанием C_{60} от пути трения, скорости трения, нагрузки на узел трения. При трибологических испытаниях металлических образцов осуществлялось сухое трение, а для оксидокерамики использовалась смазка – толуол. Износ слоев Me- C_{60} определялся с помощью интерферометра МИИ-4, а износ оксидокерамики и контртел – по потере массы на аналитических весах ВЛР 200.

Металлы, допированные фуллеренами

Исследовались пленочные композиты Me- C_{60} толщиной 150-200 нм, сформированные в вакууме на стеклянной подложке. Экспериментально установлено, что металл-фуллереновые композиты в триботехнической паре с титановым стержнем имеют низкие значения коэффициента трения, который нелинейно зависит от концентрации C_{60} . Так, для поверхности титана, модифицированной C_{60} , коэффициенты сухого трения (при скорости

скольжения $0,12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и нагрузке на остриё равной $5,0 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$) образцов с разной концентрацией C_{60} составили: 0,17 (для 1,0 масс.% C_{60}), 0,19 (для 2,0 масс.% C_{60}), и 0,25 (для 2,9 масс.% C_{60}). Для поверхностей Ni-C_{60} с такой же концентрацией C_{60} получены значения: 0,16, 0,17 и 0,25, соответственно.

Значения износостойкости металл-фуллереновых композитов зависит от типа металла, концентрации компонентов в 2-4 раза превышают значения для чистых металлов.

На рис. 1 и рис. 2 приведены зависимости коэффициентов трения и объёмного износа для пар трения (Ti-C_{60})-титан с соотношением компонентов $n_{\text{Ti}}/n_{\text{C}_{60}} = 1000$ и чистого слоя Ti -титан от нагрузки на узел трения.

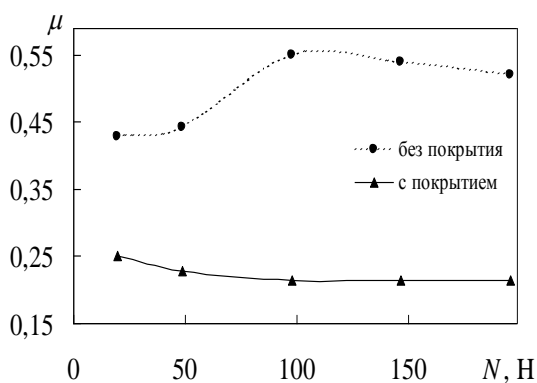


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения слоев Ti-C_{60} от нагрузки на узел трения

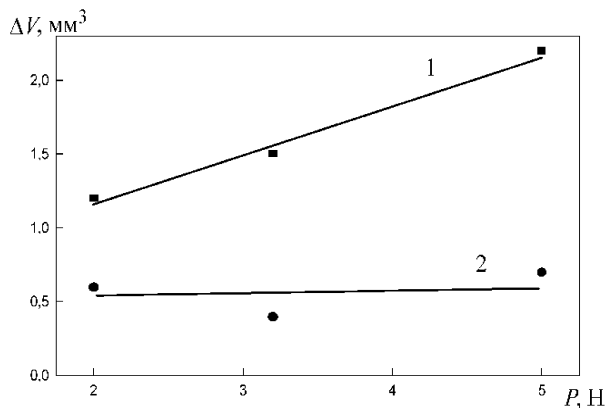


Рис. 2. Зависимость объёмного износа титана и титан-фуллеренового композита от нагрузки для пути трения $L=10000 \text{ м}$: 1 – чистый титан; 2 – титан-фуллереновый композит ($n_{\text{Ti}}/n_{\text{C}_{60}} = 1000$)

Высокие триботенические характеристики покрытий Ti-C_{60} и Ni-C_{60} объясняются сменой механизмов трения: с трения скольжения на трение качения с участием молекул C_{60} в качестве наноподшипников. Для покрытий из чистого фуллерита при повышенных нагрузках режим скольжения переходит в резание.

Оксидокерамика, допированная фуллеренами

Исследовались оксидокерамические слои, сформированные методом анодно-катодного микроплазменного оксидирования на поверхности сплава Д16Т. Толщина слоев составляла 120...150 мкм.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента трения от пути испытаний трибопары оксидокерамика-титан. При испытании немодифицированной керамики коэффициент трения на начальной стадии испытаний составляет 0,12-0,13.

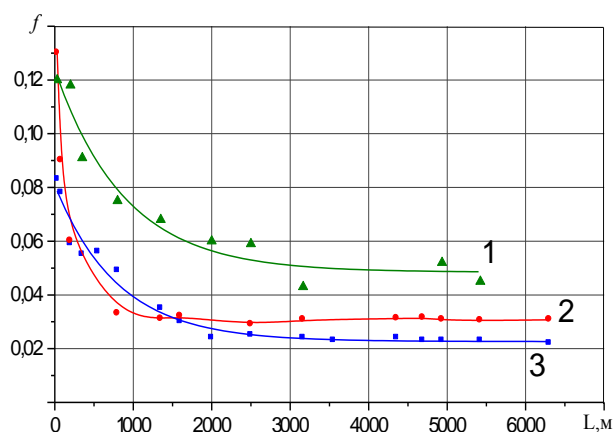


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения пары «пленка оксидокерамика -титан» от пути трения для разных поверхностных концентраций C_{60} : 1 - 0,15; 2 – 0,30; 3 – 0,45 $\text{мг}/\text{см}^2$

С увеличением пути трения L он постепенно снижается до 0,06-0,07 при $L=1500-2000 \text{ м}$ и при $L=3500-5300 \text{ м}$ составляет 0,045-0,050. Введение в керамическую матрицу фуллерена C_{60} с концентрацией $0,15 \text{ мг}/\text{см}^2$ сопровождается заметным снижением коэффициента трения (до 0,030-0,035) на стадии установившегося изнашивания. Повышение концентрации фуллеренов в оксидокерамике до $0,45 \text{ мг}/\text{см}^2$ приводит к дальнейшему снижению коэффициента трения на стадии установившегося изнашивания, для которой величина f составляет 0,020-0,025, что в 2-3 раза ниже по сравнению с парой трения, в которой оксидокерамика не модифицирована фуллеренами.

Анализ зависимостей износа титана от пути трения (рис. 4) показал, что наибольшее его значение регистрируется при трении по не модифицированной керамике. В этом случае максимальный износ достигает 1,5 мг, а средняя интенсивность изнашивания на установившейся стадии составляет $I = 9,1 \cdot 10^{-5} \text{ мг}/\text{м}$.

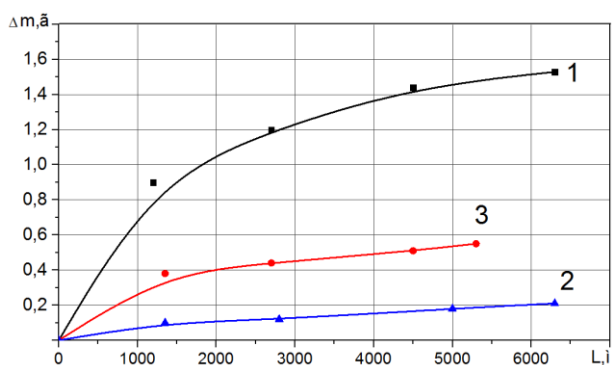


Рис. 4. Зависимость износа стали от пути трения при различной концентрации C_{60} в керамике: 1 – без C_{60} ; 2 – 0,15 мг/см²; 3– 0,45 мг/см²

Включение фуллеренов в оксидокерамику Al_2O_3 методом пропитки снижает коэффициент трения пары оксидокерамика –титан в 1,5-2 раза, износ титана – в 7 раз, Al_2O_3 – в 3 раза, что позволяет использовать этот метод для модификации поверхности пористых материалов.

Низкие значения коэффициентов трения объясняются возможной сменой механизма трения. Фуллерены вследствие замкнутости всех σ - связей могут проявлять свойства молекулярного подшипника.

Фуллереносодержащие покрытия

Разработаны рекомендации по применению фуллереносодержащих покрытий на основе металлических и оксидокерамических пленок.

Высокая биохимическая стойкость [6] и сравнительно невысокое удельное электрическое сопротивление [1] позволяют использовать титан-фуллереновые пленки в качестве покрытий для электродов кардиостимулятора. Пленки никель-фуллерен имеют низкие значения коэффициента трения, высокие значения износостойкости и твердости. Сочетание таких характеристик стало основанием использовать никель-фуллереновые покрытия в диске для резания кремниевых пластин. Высокая износостойкость анодированных слоев алюминия, модифицированных раствором C_{60} в толуоле, позволила использовать эти слои в качестве покрытия $Al_2O_3-C_{60}$ пуансона пресс-форм пластмассовых изделий.

Апробация покрытий на конкретных изделиях показала: для $Ni-C_{60}$ увеличение ресурса работы диска алмазного режущего на 20-25% (КБТМ-ОМО), а для покрытия $Al_2O_3-C_{60}$ пуансона пресс-формы пластмассовых изделий – в 14 раз (МЗХ «Атлант»). На рис. 5 представлены некоторые изделия с фуллереносодержащими покрытиями.

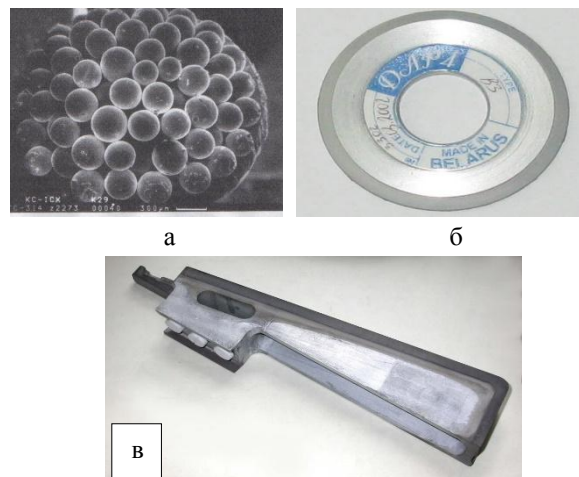


Рис. 5. Покрытия на изделиях: а – электрод кардиостимулятора с покрытием $Ti-C_{60}$; б - диск алмазный режущий с покрытием $Ni-C_{60}$; в - пуансон для прессования пластмассовых деталей холодильника (сплав ВТ-1 со слоем Al_2O_3 , содержащим C_{60})

Выводы

1. Установлено, что введение фуллеренов в металлические и оксидокерамические матрицы существенно (в некоторых случаях в разы) уменьшает значения коэффициентов трения и увеличивает износостойкость.

2. Повышение долевого содержания углеродных наночастиц выше 2,0 мас.% в материалах оказывается менее эффективным, чем в случае малых добавок.

3. Разработаны и апробированы на конкретных изделиях фуллереносодержащие покрытия на основе металлических и оксидокерамических пленок.

4. Показано, что уникальные свойства углеродных фуллеренов и материалов, их содержащих, указывают на перспективы использования этих материалов в электронике, оптоэлектронике, биомедицине, значительно увеличивая возможности приборов и механизмов.

Работа выполнена в рамках международного сотрудничества Института им. А.В. Лыкова НАН Беларуси и Монгольского национального университета и финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (коды проектов: Ф19МН-003 и Т22МН-005).

[1] Shpilevsky E.M., Tuvshintur P., Filatov S.A. Metal-fullerene materials for electronics. //Nanoscience and Technology. – 2019. – №4. – С. 303-309.

[2] Шпилевский Э.М. Фуллереносодержащие пленки и покрытия. / Э.М. Шпилевский, С.А. Филатов //Сб. «Машиностроение и техносфера XXI века» Донецк. 2021. – С. 591-595.

[3] Шпилевский Э.М. Композиционные материалы на основе металлов и фуллеренов // Актуальные проблемы прочности. Монография в 2т. Витебск: ВГТУ, 2018. – Т. 2. – С.428-454.
[4] Shpilevsky E.M. et al. Properties of metal-fullerene composites // Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2019. – Т. 288. – С. 124-129.

[5] Tuvshintur P. et al. Optical Property of Contained Fullerene Polymers //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2021. – Т. 323. – С. 42-47.

[6] Зорин В.П., Кравченко И.Е., Шпилевский Э.М. Модификация фуллереном C₆₀ процессов адгезии иммунных клеток на поверхности материалов//Низкоразмерные системы. Вып. 4. – Гродно: ГрГУ, 2005. – С. 50-54.

ГЛУБОКАЯ ВЫТЯЖКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕВИТАМЕТАЛЛИЗАНТА РВ-18 В ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Шульга Г.И.* , Колесниченко А.О., Лебединский И.Ю., Скринников Е.В.,
Черников Н.С., Самойленко М.Н.

*E-mail: g.shulga41@mail.ru

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.

Технологический процесс глубокой вытяжки рассмотрен как трибообъект, состоящий из трибосистем, включающих контактирующие трущиеся пары при взаимодействии штамповый инструмент – технологический смазочный материал Ревитаметаллизант РВ-18 – деформируемое изделие. Выполнено моделирование процесса глубокой вытяжки в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench, что позволял оценивать напряжения, главные деформации, оптимизировать геометрические параметры штампового инструмента, пуансона, толщину листовой заготовки.

Ключевые слова: глубокая вытяжка, штамповый инструмент, пуансон, смазочный материал, коэффициент трения, износ, ревитаметаллизант.

DEEP DRAWING OF AXISYMMETRIC BLANKS FROM SHEET STEEL USING REVITAMETALLIZANT RV-18 IN DIGITAL TRANSFORMATION

Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Lebedinsky I.Yu., Skrinnikov E.V., Chernikov N.S., Samoilenko M.N.

The technological process of deep drawing is considered as a tribo-object, consisting of tribosystems, including contacting rubbing pairs in the interaction of a stamping tool - technological lubricant Revitametalizant RV-18 - a deformable product. The simulation of the deep drawing process was carried out in the ANSYS Workbench finite element analysis software package, which made it possible to evaluate stresses, main deformations, optimize the geometric parameters of the stamping tool, punch, and sheet blank thickness.

Keywords: deep drawing, die tool, punch, lubricant, coefficient of friction, wear, revitametalizant.

Введение

Глубокой вытяжкой получают осесимметричные, плоские и пространственные детали разнообразных размеров и конфигураций с минимальной металлоемкостью при заданной их прочности и жесткости [1]. Актуальной проблемой является разработка научно-обоснованных триботехнологий получения осесимметричных изделий из листовых сталей глубокой вытяжкой с применением водорастворимых экологически безопасных смазочных материалов, работающих в условиях комбинированного механо-физико-химического воздействия [2,3]. Такие

триботехнологии с использованием универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS Workbench позволяют определять напряжения, деформации, производить оптимизацию данных процессов, повышать качество и эксплуатационные характеристики получаемых изделий. Их применение является актуальной задачей современного машиностроения.

Цель работы – повышение долговечности штампового инструмента при глубокой вытяжке изделий из листовых сталей, улучшение качества поверхностей изделий разработкой нового Ревитаметаллизанта РВ-18.

Задачи исследования – произвести оценку смазочные свойства нового Ревитаметаллизанта РВ-18 по разработанной методике; оптимизировать процесс глубокой вытяжки осесимметричных заготовок из листовых сталей с применением Ревитаметаллизанта РВ-18 на модели вытяжки в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench.

Материалы и методы

Технологический процесс глубокой вытяжки рассмотрен как трибообъект, состоящий из трибосистем I-VII [3], включающие контактирующие трущиеся пары, технологический смазочный материал, воздушную среду, обеспечивающие коэффициенты трения ($\mu_1 - \mu_7$) необходимые для реализации технологического процесса глубокой вытяжки изделия: I – плоский прижим – плоская заготовка (μ_1), II – плоская заготовка – плоская матрица (μ_2); III – радиус заготовки – радиус матрицы (μ_3); IV – цилиндрическая заготовка – цилиндрическая матрица (μ_4); V – цилиндрический пуансон – цилиндрическая заготовка (μ_5); VI – радиус пуансона – радиус матрицы (μ_6); VII – плоский пуансон – плоская заготовка (μ_7). Возможные напряжения, деформации, возникающие при глубокой вытяжке осесимметричных деталей из листовых сталей, а также трибосопряжения I-VII приведены на рис. 1

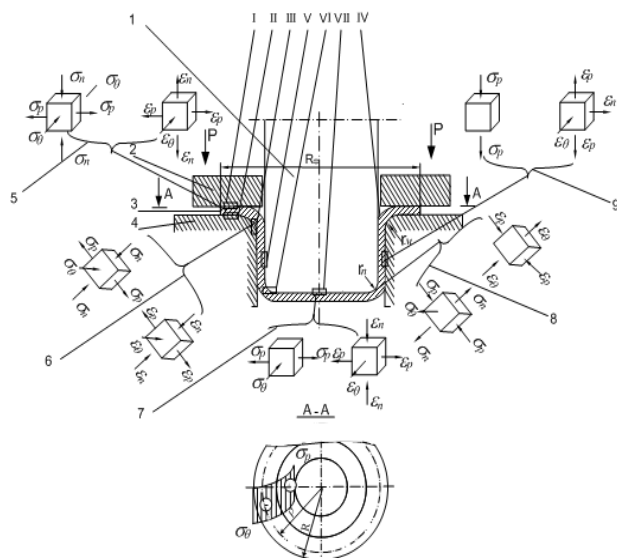


Рис. 1. Схема глубокой вытяжки осесимметричных заготовок из листовых сталей: 1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – заготовка; 4 – матрица; 5-9 – напряжения, деформации в элементах заготовки, I-VII – трибосистемы

Качество деформируемых поверхностей заготовок, долговечность штампового инструмента зависит от химического состава листовых

материалов заготовок, штампового инструмента, а также от напряжений и деформаций, возникающих в приведенных трибосистемах I-VII в процессе глубокой вытяжки, а также смазочных материалов.

На основании обобщенного закона трения при пластической деформации Исаченкова В.Е., Исаченкова Е.И. определена удельная сила трения при пластической деформации [4]. Контактные явления, происходящие в трибосопряжениях без применения смазочного материала и с применением смазочного материала с малой вязкостью и низкой смазочной способностью, описаны теорией трения Ф.П. Бодена и Д. Тейбора – сваривания, среза и пропахивания. Данная теория применена для описания контактных процессов, происходящих в трибосопряжении штамповой инструмент-деформируемое изделие [5].

Результаты контактного взаимодействия штамповый инструмент-обрабатываемое изделие с использованием Ревитаметаллизанта РВ-18 были получены результаты на торцевой машине трения с коэффициентом взаимного перекрытия $0,5 \leq K_{вз} \leq 1$. Площадь контакта образца и контртела составляет $2,5 \text{ см}^2$. В качестве материала цилиндрического образца использовали стали X12M, X6BФ XBG ГОСТ 5950-200, имитирующие штамповый инструмент – матрицу и пуансон. Контртело 4 представляет собой пластину толщиной 1,5 мм и диаметром 48 мм, изготавливаемая из материалов сталь 3кп ГОСТ 380-2005, сталь 08кп ГОСТ1050-88, сталь 08Ю ГОСТ 9045-93, имитирующие деформируемые изделия.

Для определения противоизносных, антифрикционных характеристик ВТСС используют следующие режимы работы машины трения частота вращения шпинделя $n = 47,3 \text{ мин}^{-1}$ (линейная скорость вращения 0,01 м/с); осевая нагрузка P_{oc} может изменяться в пределах 0,01-1,5 МПа; время испытаний при фиксированной нагрузке 6 мин. Осевую нагрузку увеличивали, начиная с 0,1 до 1 МПа.

Для оптимизации технологического процесса глубокой вытяжки листовых сталей с использованием Ревитаметаллизанта РВ-18 с добавками нанопорошков цветных металлов использовали универсальную программную систему конечно-элементного анализа ANSYS Workbench. На компьютерной модели технологического процесса вытяжки получения осесимметричных деталей из листовых сталей учитывали все коэффициенты трения в трибосопряжениях.

Выполнено моделирование технологического процесса глубокой вытяжки в программном

комплексе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench для штампового инструмента из сталей X12M, ХВГ, Х6ВФ. заготовок из листовых сталей Ст.3, 08кп, 08Ю.

Проведены исследования влияния 40%-ного водного раствора Ревитаметаллизанта РВ-18 с добавками нанопорошков цветных металлов: цинка, меди, бронзы на эффективность процесса по основным критериям: максимальная глубина вытяжки до разрыва, максимальные напряжения, возникающие в образце в течение всего исследуемого процесса. Геометрические параметры модели штампового инструмента для глубокой вытяжки листовых сталей с прижимом приведены на рис. 2. Основными элементами конструкции штампового инструмента являются: матрица 1, заготовка 2, прижимаемая к матрице прижимом 3 прижимным усилием $P_{пр}$, пуансон 4, поступательно перемещающийся с постоянной скоростью, на который действует усилие вытяжки $P_{вып}$.

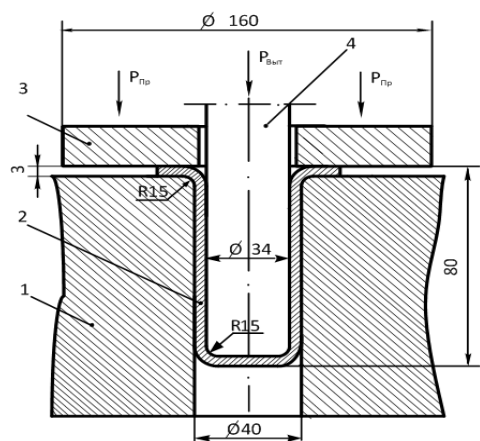


Рис. 2. Геометрические параметры модели штампового инструмента для глубокой вытяжки листовых сталей с прижимом: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – прижим; 4 – пуансон

Физико-механические свойства материалов задавали параметрами: плотность, модуль упругости Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести. Для определения напряжений, возникающих при глубокой вытяжке в заготовке в модели штампового инструмента, выбирали заготовку диаметром 90 мм, толщиной 3 мм. При таком выборе вытягивалась цилиндрическая деталь с внешним диаметром 40 мм, внутренним диаметром 34 мм с фланцем диаметром 60 мм.

Результаты и обсуждение

Проведены сравнительные лабораторные испытания смазочного действия Ревитаметаллизанта РВ-18, содержащего фрактальные лигандные кластеры, с добавками 1-2 % по массе нанопорошков цинка, меди, бронзы на торцевой

машине трения пары сталь X12M-сталь 08Ю с увеличением удельной осевой нагрузки. Результаты испытаний с добавками 1-2 % по массе бронзы приведены на рис. 3 а, б, в. Смазочные свойства Ревитаметаллизанта РВ-18 с добавками нанопорошков цветных металлов оценивали по величинам износов цилиндрического и круглого плоского образцов, коэффициенту трения испытываемой пары трения.

Исследования показали, что лучшими противозносными свойствами ревитаметаллизант РВ-18 обладает при смазывании пары трения сталь X12M - сталь 08Ю с добавками нанопорошка 1% меди и бронзы, 2% цинка. Оксидные пленки C_2O_3 на стали X12M ухудшали противозносные свойства РВ-18, так как обладают пассивирующими свойствами и препятствуют образованию химических соединений с компонентами РВ-18. Минимальные коэффициенты трения 0,16-0,18 были достигнуты с добавкой 1% нанопорошка меди, бронзы, 2% цинка при удельных нагрузках 60-90 МПа.

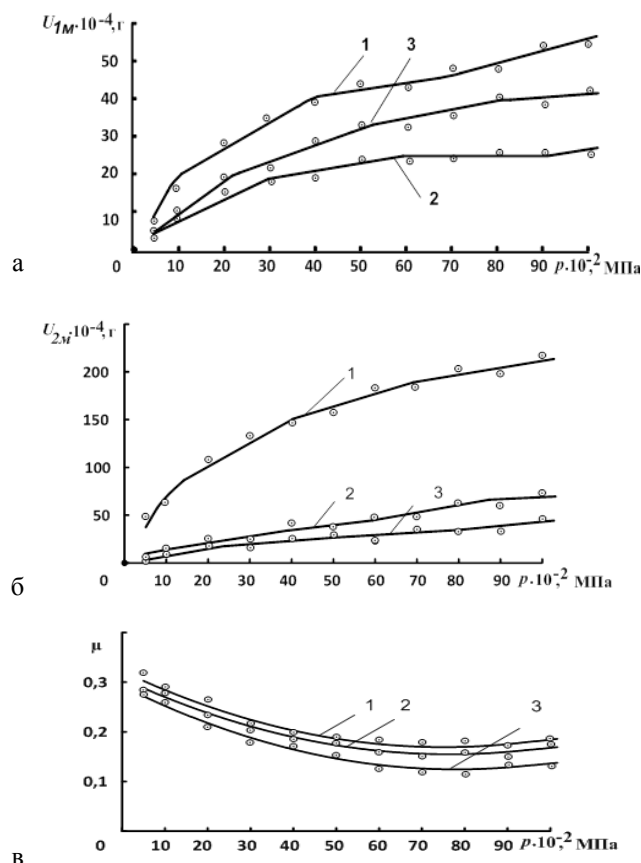


Рис. 3. Зависимость износа образцов и коэффициента трения от удельной нагрузки при смазывании Ревитаметаллизантом РВ-18 и с добавлением наночастиц бронзы: а – износ образца из стали X12M; б – износ образца из стали 08Ю; в – коэффициент трения в трибосоприжении X12M-08Ю; 1 – РВ-18; 2 – РВ18+1% бронзы; 3 – РВ-18 +2% бронзы

Выполнено моделирование технологического процесса глубокой вытяжки в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench для заготовок из сталей: Ст3кп, 08кп, 08Ю. При вытяжке толщина дна при трении без смазочного материала уменьшалась с 3 мм до 2,2 мм, а при смазывании 40%-ным водным раствором с 3 мм до 1,4 мм у испытуемых сталей. По пределу текучести методом конечно-элементного анализа ANSYS Workbench можно производить сравнительную оценку смазочных свойств технологических смазочных материалов.

На рис. 4 приведен эпюра распределения суммарных напряжений по Мизесу (Equivalent von Mises Stress) в цилиндрических заготовках из листовых сталей Ст3кп, 08кп, 08Ю в момент разрыва с использованием 40% -ного водного раствора смазочного материала РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди. Эпюры позволяют также оценивать суммарные напряжения, возникающие в заготовке в любой момент технологического процесса вытяжки [6].

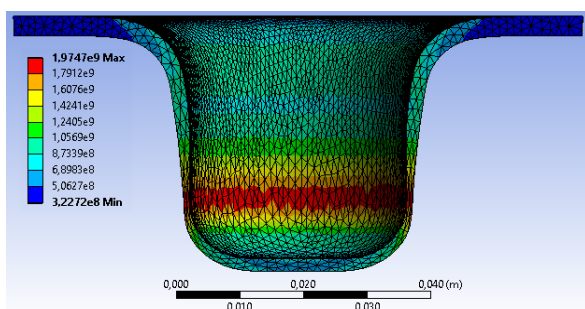


Рис. 4. Эпюра распределения суммарных напряжений по Мизесу (Equivalent von Mises Stress) в заготовках из листовых сталей Ст3кп, 08Ю в момент разрыва с использованием 40%-ного водного раствора Ревитаметаллизанта РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди

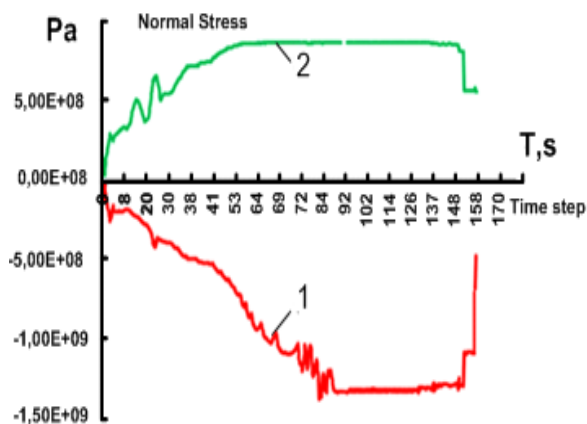


Рис. 5. Изменение нормальных напряжений во времени при вытяжке изделий из листовой стали 08Ю и смазывании 40%-ным водным раствором Ревитаметаллизанта РВ-18 в сечениях: 1 – широтных; 2 – меридиональных

Из рис. 5 следует, что процесс глубокой вытяжки был реализован в течение 156 с, который сопровождался сжатием (рис. 5, кривая 1) и растяжением (рис. 5, кривая 2) листовой круглой заготовки. Процесс сжатия происходил за счет прижима заготовки и вследствие деформирования ее в осесимметричную заготовку. Действие сжимающих нормальных напряжений фиксировалось в течение 86 с.

Максимальные нормальные сжимающие напряжения достигали величины $-1,36 \cdot 10^9$ Па. Далее величина нормальных сжимающих напряжений оставалась величиной постоянной и их действие продолжалось еще в течение 70 с и далее снижалось до $4,8 \cdot 10^8$ Па. Процесс растяжения происходил при получении цилиндрической заготовки, имеющей соответствующую высоту. Процесс растяжения заготовки фиксировался в течение 61 с. Максимальные нормальные напряжения достигали величины $7,5 \cdot 10^8$ Па. Далее величина нормальных растягивающих напряжений оставалась величиной постоянной и ее действие продолжалось еще в течение 95 с и далее снижалась до $5,2 \cdot 10^8$ Па.

Заключение

Для повышения износостойкости, долговечности трибосопряжений, улучшения качества деформируемых изделий при глубокой вытяжке листовых сталей перспективными для исследований являются технологии получения технологических смазочных материалов – ревитаметаллизантов по золь-гель технологиям.

Предложено использовать триботехнологии с применением Ревитаметаллизанта РВ-18, который обеспечивает самоорганизацию в трибосопряжениях штамповый инструмент-деформируемая листовая заготовка смазочных слоев вследствие формирования технологическими приемами фрактальных структур в смазочном материале

Программная система конечно-элементного анализа ANSYS Workbench позволяет определять максимальные нормальные и касательные широтные, меридиональные напряжения в процессе глубокой вытяжки осесимметричных заготовок из листовых сталей.

- [1] Теория пластических деформаций металлов /Е.П. Унков, У. Джонсон, В.Л. Колмагоров и др.; Под ред. Е.П. Ункова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
- [2] Основы расчетов на трение и износ /И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
- [3] Справочник по холодной штамповке /В.П. Романовский – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
- [4] Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением /Е.И. Исаченков – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

[5] Трение и смазка твёрдых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; Перевод с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина; Под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
[6] Complex Method for Evaluating Lubricating Properties of Technological Tools and Stresses When Drawing Products from Sheet

Steel / G.I. Shulga, A.O. Kolesnichenko, I. Yu. Lebedinsky // Lecture Notes in Mechanical Engineering. - Switzerland: Springer, 2019. - Book series: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). – Т. 1. – С. 1163-1173.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

¹Щербакова С.С., ¹Легостаева А.П., ²Антипова И.А., ¹Дроган Е.Г.*

*E-mail: ekaterina.drogan@gmail.com

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия;

²ООО «Фирма Элмика», Ростов-на-Дону, Россия.

В статье изучены трибологические свойства полимерных композиций на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) с добавлением политетрафторэтилена и ПЭЭК с добавлением 30 % стекловолокна. Установлено значительное повышение антифрикционных свойств ПЭЭК с добавлением 30% стекловолокна и ПЭЭК с добавлением ПТФЭ в сравнении с ПЭЭК без добавок и снижение коэффициента более чем в 2 раза. Выявлено изменение морфологии поверхности полимерных материалов до и после трения что указывает на повышение температуры в зоне трения до температуры плавления полимерного материала.

Ключевые слова: износ, коэффициент трение, полимерные материалы.

Введение

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) представляет собой высокоэффективный полимер, который можно рассматривать в качестве замены различным сплавам во многих отраслях промышленности. Обусловлено это наличием у ПЭЭК ряда свойств, таких как высокая ударная вязкость, высокая температура плавления и температуру стеклования, высокая температура непрерывной эксплуатации. Кроме того, он обладает высокой устойчивостью к органическим растворителям, кислотам и основаниям, что объясняет его стабильную и инертную химическую природу. По сравнению с металлами полимеры обладают определенными свойствами, необходимыми для технического применения, а именно легким весом (низкой плотностью), низкой стоимостью, простотой

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON POLYETHERETHERKETONE

**Shcherbakova S.S., Legostaeva A.P., Antipova I.A.,
Drogan E.G.**

The article studies the tribological properties of polymer compositions based on polyetheretherketone (PEEK) with the addition of polytetrafluoroethylene and PEEK with the addition of 30% glass fiber. A significant increase in the antifriction properties of PEEK with the addition of 30% glass fiber and PEEK with the addition of PTFE in comparison with PEEK without additives and a decrease in the coefficient by more than 2 times have been established. A change in the surface morphology of polymeric materials before and after friction was revealed, which indicates an increase in temperature in the friction zone to the melting point of the polymeric material.

Keywords: wear, coefficient of friction, polymeric materials.

производства, самосмазываемостью и коррозионной стойкостью [1-5]. Поэтому полимеры все чаще используются в трибологии, особенно для жестких условий смазки, таких как подшипники, шестерни, поршневые кольца в машинах или других механических компонентах, используемых в условиях высоких температур и агрессивных сред.

Среди специальных полимеров ПЭЭК является одним из наиболее перспективных инженерных материалов для применения в трибологии. При этом от многих полимерных материалов и композитов ПЭЭК отличается своими трибологическими характеристикам [6]. Ненаполненный ПЭЭК обладает выдающейся износостойкостью, но, как правило, имеет высокие коэффициенты трения [7, 8]. Таким образом, для улучшения трибологических

свойств ПЭЭК часто модифицируют различным наполнителями.

В настоящей работе исследованы трибологические свойства полимерных композитов на основе ПЭЭК с политетрафторэтиленом (ПТФЭ) и стекловолокном.

Материалы и методы

Для определения триботехнических характеристик полимерных композиций на основе ПЭЭК проводились исследования из антифрикционных свойств в режиме сухого трения скольжения.

Трибологические характеристики исследовали на машине трения торцевого типа УМТ 200. Пара трения представляла собой контакт площадей «палец – диск». Палец был изготовлен из полиэфирэфиркетона (Тесареек), полиэфирэфиркетона с добавлением 30% стекловолокна (Тесареек GF30) и полиэфирэфиркетона с добавлением политетрафторэтилена (Тесареек TF). Метод производства полимерной заготовки – экструзия, метод производства полимерного образца – механическая обработка. В качестве контртела выступал диск из стали 40Х. Перед проведение испытаний стальной диск зачищали на шлифовальной бумаге, промывали дистиллированной водой, обезжиривали гексаном и высушивали на воздухе. Трибологические испытания проводили в течение 60 минут максимального времени при давлении 0,3 МПа, 1 МПа, 3 МПа и скорости скольжения 0,3 м/с и 1 м/с. Испытания для каждого образца повторяли 3 раза.

Определения износостойкости полимерных композитов на основе ПЭЭК проводили методом взвешивания данных образцов до и после трибологических испытаний на аналитических весах.

Морфология поверхности полимерного композиционного материала до и после трения была изучена методом оптической микроскопии с помощью микроскопа Carl Zeiss.

Результаты и обсуждение

Изучение антифрикционных свойств ПЭЭК без добавок и с добавлением стекловолокна и ПТФЭ при различных условиях трения показало на их значительные различия. Установлено, что полимерные композиционные материалы на основе ПЭЭК с добавлением стекловолокна и ПТФЭ характеризуются значительным снижением коэффициента трения в сравнении с ПЭЭК без добавок, рис. 1-4.

При сухом трении со скоростью скольжения 1 м/с и давлением 0,3 МПа коэффициента трения снижается более чем в 2 раза в паре трения сталь –

ПЭЭК с добавлением 30% стекловолокна и в 1,5 раза в паре трения сталь – ПЭЭК с добавлением ПТФЭ, рис. 1. При этом, наблюдается износ ПЭЭК без добавок, выраженный потерей веса и изменением морфологии поверхности трения.

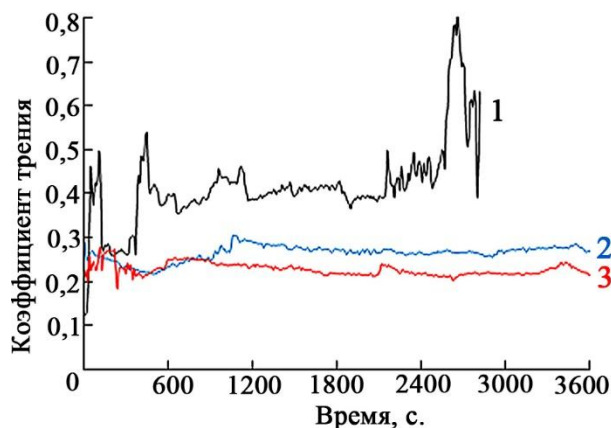


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от времени в паре полимерный материал – сталь при давлении 0,3 МПа и скорости скольжения 1 м/с: 1 – ПЭЭК, 2 – ПЭЭК+ ПТФЭ, 3 – ПЭЭК + 30% стекловолокно

Изменение условия трения – уменьшение скорости скольжения до 0,3 м/с и повышением давления в зоне трения до 1 МПа способствует снижению коэффициента трения ПЭЭК без добавок до 0,31, рис. 2. Аналогично уменьшаются значения коэффициентов трения при изменении условий трения и для полимерных композиционных материалов на основе ПЭЭК с добавлением ПТФЭ и стекловолокна до 0,21 и 0,15 соответственно, рис. 2.

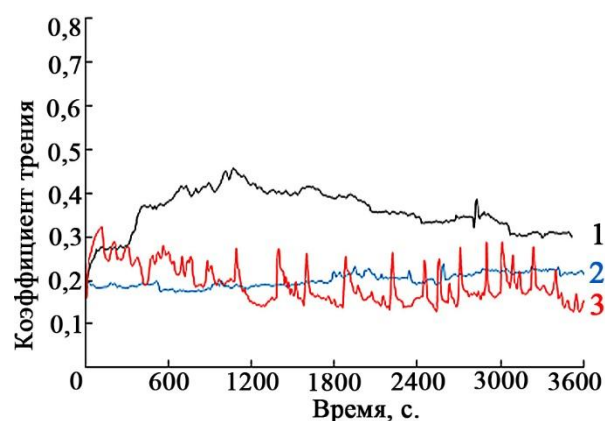


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от времени в паре полимерный материал – сталь при давлении 1 МПа и скорости скольжения 0,3 м/с: 1 – ПЭЭК, 2 – ПЭЭК + ПТФЭ, 3 – ПЭЭК + 30% стекловолокно

Увеличение скорости скольжения до 1 м/с при нагрузке 1 МПа отрицательно сказывается на антифрикционных свойствах ПЭЭК. При трении наблюдается значительный износ образца, изменение его геометрических размеров и потеря веса через 600 с фрикционного взаимодействия,

рис. 3. Коэффициент трения ПЭЭК с добавлением ПТФЭ при данных условиях трения, рис. 3, незначительно увеличивается в сравнении со значением коэффициента трения данного материала при фрикционном взаимодействии со скоростью скольжения 0,3 м/с и 1 МПа, что может быть обусловлено увеличением скорости скольжения и как следствие повышением температуры в зоне трения.

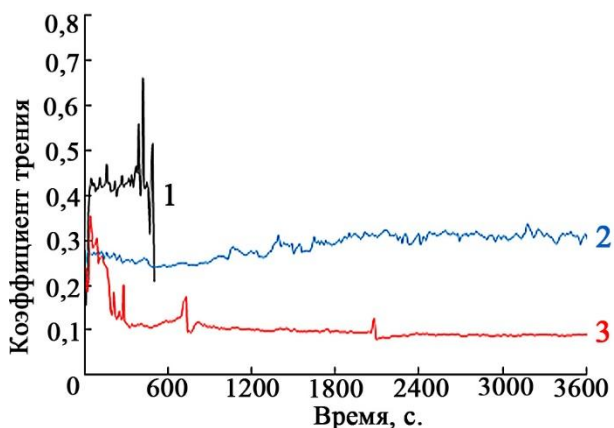


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от времени в паре полимерный материал – сталь при давлении 1 МПа и скорости скольжения 1 м/с: 1 – ПЭЭК, 2 – ПЭЭК + ПТФЭ, 3 – ПЭЭК + 30% стекловолокно

Исследование антифрикционных свойств полимерных материалов при скорости скольжения 1 м/с и 3 МПа показало их значительный износ, рис. 4. При этом время фрикционного взаимодействия было значительно сокращено.

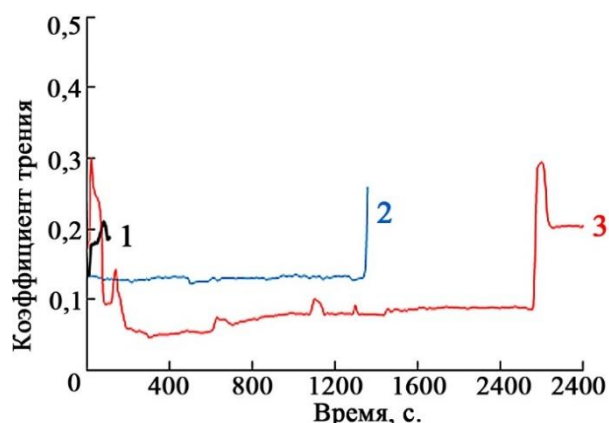


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от времени в паре полимерный материал – сталь при давлении 3 МПа и скорости скольжения 1 м/с: 1 – ПЭЭК, 2 – ПЭЭК + ПТФЭ, 3 – ПЭЭК + 30% стекловолокно

Полученные результаты могут быть обусловлены повышением температуры в зоне трения. Полимеры обычно являются хорошими изоляторами. Таким образом, тепло в процессе трибовзаимодействия пары полимерный композиционный материал – сталь не может быть

легко и быстро отведено, поэтому температура в зоне трения может быть достаточно высокой. При этом, сильный износ полимерного материала, вероятно, будет инициирован плавлением поверхности трения и тепловыми переходными процессами.

Анализ поверхности трения показывает изменения в ее морфологии, которые указывают на то, что температура поверхности при трении была близка к температуре плавления полимерного материала, рис. 5.

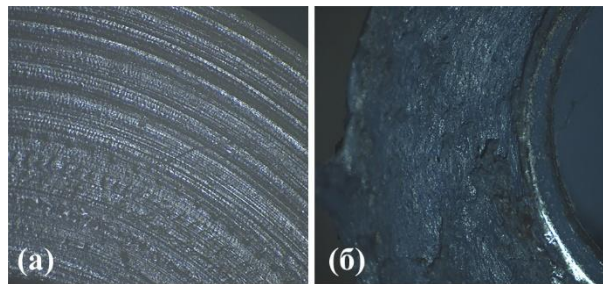


Рис. 5. Результаты оптической микроскопии поверхности полимерного материала: 1 – до трения, 2 – после трения

Заключение

Экспериментально было установлено значительное повышение антифрикционных свойств ПЭЭК с добавлением 30% стекловолокна и ПЭЭК с добавлением ПТФЭ в сравнении с ПЭЭК без добавок. При различных условиях фрикционного взаимодействия (скорость скольжения и давления) коэффициента трения полимерных композиционных материалов в сравнении с ПЭЭК снижается более чем в 2 раза.

Выявлено изменение морфологии поверхности полимерных материалов до и после трения что указывает на повышение температуры в зоне трения до температуры плавления полимерного материала.

- [1] Zhang L. et al. PEEK reinforced with low-loading 2D graphitic carbon nitride nanosheets: High wear resistance under harsh lubrication conditions // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Т. 109. – С. 507-516.
- [2] Tang Q., Chen J., Liu L. Tribological behaviours of carbon fibre reinforced PEEK sliding on silicon nitride lubricated with water // Wear. – 2010. – Т. 269. – №. 7-8. – С. 541-546.
- [3] Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2018. – Т. 1. – №. 1. – С. 3-39.
- [4] Regis M. et al. Wear behavior of medical grade PEEK and CFR PEEK under dry and bovine serum conditions // Wear. – 2018. – Т. 408. – С. 86-95.
- [5] Uflyand I.E. et al. Testing the mechanical and tribological properties of new metal-polymer nanocomposite materials based on linear low-density polyethylene and Al₆₅Cu₂₂Fe₁₃ quasicrystals // Polymer Testing. – 2019. – Т. 74. – С. 178-186.
- [6] Natarajan E. et al. Mechanical and wear behaviour of PEEK, PTFE and PU: review and experimental study // Journal of Polymer Engineering. – 2022.

[7] Laux K.A. et al. The influence of surface properties on sliding contact temperature and friction for polyetheretherketone (PEEK) // Polymer. – 2016. – Т. 103. – С. 397-404.

[8] Tolochko O.V. et al. Friction and Wear of Polyetheretherketone Samples With Different Melt Flow Indices // Journal of Tribology. – 2022. – Т. 144. – №. 6.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИГРУЗКИ НА ВНЕДРЕНИЕ ШТАМПА В ВЯЗКОУПРУГИЙ СЛОЙ

Яковенко А.А. *, Горячева И.Г.

*E-mail: anastasiya.yakovenko@phystech.edu

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

В работе построено решение задачи о внедрении в толстый вязкоупругий слой сферического штампа при наличии пригрузки. Пригрузка равномерно распределена вне области контакта по не меняющейся со временем кольцевой области. Исследовано влияния величины пригрузки, положения и размеров области ее приложения на зависимость глубины внедрения штампа от времени. Полученные результаты могут быть использованы для приближенного анализа контактных характеристик в условиях дискретного контакта вязкоупругих тел.

Ключевые слова: вязкоупругий слой, пригрузка, осесимметричный штамп, контактная жесткость.

Введение

Многие материалы, например, различные виды полимеров, биологические ткани, обладают вязкоупругими свойствами. Этот факт вносит дополнительную переменную, а именно время, в решение контактных задач, что не учитывается классической задачей Герца [1]. При контакте тел, обладающих реологическими свойствами, величина их сближения даже при постоянной силе сжатия будет изменяться во времени. Поэтому при исследовании контактной жесткости таких сопряжений необходимо учитывать вязкоупругие свойства материалов.

Помимо этого, контакт тел может происходить не только по односвязной области. Для негладких контактных поверхностей взаимодействие тел происходит на отдельных пятнах контакта. В случае малой плотности контакта, когда пятна удалены друг от друга на большое расстояние, их взаимное влияние пренебрежимо мало. Однако при повышении контактной плотности ошибки,

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF ADDITIONAL LOADING ON THE PUNCH INDENTATION INTO THE VISCOELASTIC LAYER

Yakovenko A.A., Goryacheva I.G.

The solution of the problem of indentation of a spherical punch into a thick viscoelastic layer in the presence of additional loading is presented. The additional loading is evenly distributed outside the contact area over a constant annular region. The influence of the additional loading value, location and the annular region thickness on the dependence of the indentation depth on time is investigated. The obtained results can be used for approximate analysis of contact characteristics in discrete contact of viscoelastic bodies.

Keywords: viscoelastic layer, additional loading, axisymmetric punch, contact stiffness.

вносимые пренебрежением взаимным влиянием, могут возрасть. И для вязкоупругих тел этот факт существенен.

В данной работе для оценки влияния нагруженности вязкоупругого тела вне области контакта на контактные характеристики поставлена и решена задача о внедрении в вязкоупругий слой осесимметричного штампа при наличии пригрузки, распределенной по кольцевой области.

Постановка задачи

Рассматривается задача о внедрении в вязкоупругий слой толщины h , лежащий на жестком основании, осесимметричного штампа под действием заданной нагрузки $P(t)$ (рис. 1). На слой вне области контакта также действует некоторая пригрузка $q(t)$, равномерно распределенная по не меняющейся во времени кольцевой области с внутренним радиусом a_1 и внешним радиусом a_2 . Считается, что деформации слоя малы, и для описания его механического поведения применима линейная теория вязкоупругости.

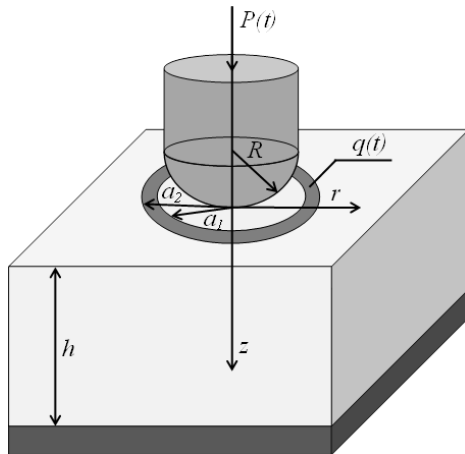


Рис. 1. Схема контактной задачи

Для упругого слоя связь вертикальных смещений $w(r, h)$ границы слоя и давлений $p(r)$, их вызывающих, в осесимметричном случае имеет следующий вид [2]

$$w(r, h) = \frac{2(1-\nu^2)}{Eh} \int_0^a K\left(\frac{r}{h}, \frac{\rho}{h}\right) p(\rho) \rho d\rho, \quad (1)$$

где $K(x, y) = \int_0^\infty L(u) J_0(xu) J_0(yu) du$, $L(u)$ – функция, вид которой определяется способом крепления слоя к жесткому основанию [2] (либо сцеплен, либо лежит без трения), $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка, E – модуль упругости слоя, ν – его коэффициент Пуассона, а a – радиус области действия приложенного к слою давления. В [2] показано, что ядро интеграла в равенстве (1) можно представить в следующем виде

$$K(x, y) = \frac{2}{\pi(x+y)} \mathbf{K}\left(\frac{2\sqrt{xy}}{x+y}\right) - F(x, y), \quad (2)$$

где $\mathbf{K}(x)$ – полный эллиптический интеграл первого рода, а функция $F(x, y)$ в квадрате $0 \leq x, y < 1$ представима следующим абсолютно и равномерно сходящимся по совокупности переменных рядом

$$F(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} b_{ij} x^{2i} y^{2j}, \quad (3)$$

где значения коэффициентов b_{ij} также определяются способом крепления слоя к жесткому основанию [2].

Для получения из (1) выражения для смещений $w(r, h, t)$ границы вязкоупругого слоя можно воспользоваться принципом соответствия [3].

Тогда получим

$$w(r, h, t) = \frac{2(1-\nu^2)}{h} \cdot \int_0^t J(t-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\int_0^{a(\tau)} K\left(\frac{r}{h}, \frac{\rho}{h}\right) p(\rho, \tau) \rho d\rho \right) d\tau. \quad (4)$$

Выражение (4) получено в предположении постоянства коэффициента Пуассона, когда для записи определяющего уравнения механического поведения вязкоупругого материала достаточно одной функции ползучести $J(t)$ (например, соответствующей одноосному растяжению/сжатию).

Исходя из выражений (2) и (4) можно сделать вывод, что в случае толстого слоя, когда $h \gg a_2$, поставленная задача в первом приближении будет эквивалентна задаче для вязкоупругого полупространства. Оценки значений соотношения h/a , при которых справедливо приближение слоя полупространством, приведены в [4]. Для уточнения же найденного решения в выражении для ядра (2) следует учесть несколько первых членов ряда (3).

Исследование случая толстого слоя

Предположим, что условие $h \gg a_2$ выполняется, и найдем решение в этом случае.

Представим смещение границы вязкоупругого слоя как сумму двух: $w_1(r, t)$, вызванные действием давления $p(r, t)$ внутри области контакта, и $w_2(r, t)$, вызванные действием пригрузки в виде равномерно распределенного по кольцевой области давления $q(t)$. Рассмотрим сферический штамп, форму контактирующей поверхности которого можно описать функцией $f(r) = r^2/(2R)$, где R – радиус кривизны штампа. В этом случае пятно контакта штампа со слоем будет представлять собой круг радиуса $a(t)$.

Найдем сначала смещения слоя $w_2(r, t)$ от действия пригрузки. Исходя из формул (2), (4) и постоянства размеров области приложения пригрузки, получим следующий результат [5]

$$w_2(r, t) = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi} \left(\int_0^t J(t-\tau) \frac{dq(\tau)}{d\tau} d\tau \right) \cdot \left(a_2 \mathbf{E}\left(\frac{r}{a_2}\right) - a_1 \mathbf{E}\left(\frac{r}{a_1}\right) \right), \quad r \leq a_1. \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{E}(x)$ – полный эллиптический интеграл второго рода.

Рассмотрим случай, когда область контакта штампа со слоем не убывает со временем. Тогда решение задачи можно построить на основе упругого решения, заменив в нем множитель $1/E$ вязкоупругим оператором с ядром $J(t)$ [6]. В упругом случае решение осесимметричной контактной задачи в общем виде получено в [7]. Применяв это решение для исследования поставленной вязкоупругой задачи, с учетом (5) получим следующее выражение для зависимости глубины внедрения штампа в слой d от времени

$$d(t) = \frac{a^2(t)}{R} + 2(1-\nu^2)\bar{q}(t) \cdot \left(\sqrt{a_2^2 - a^2(t)} - \sqrt{a_1^2 - a^2(t)} \right), \quad (6)$$

где $\bar{q}(t) = \int_0^t J(t-\tau) \left(\frac{dq(\tau)}{d\tau} \right) d\tau$. Радиус же пятна контакта $a(t)$ находится из условия равновесия, а именно

$$\bar{P}(t) = \frac{4a^3(t)}{3(1-\nu^2)R} - 2\bar{q}(t) \left(a_2^2 \arcsin\left(\frac{a(t)}{a_2}\right) - a_1^2 \cdot \arcsin\left(\frac{a(t)}{a_1}\right) - a(t) \left(\sqrt{a_2^2 - a^2(t)} - \sqrt{a_1^2 - a^2(t)} \right) \right), \quad (7)$$

где $\bar{P}(t) = \int_0^t J(t-\tau) (dP(\tau)/d\tau) d\tau$.

Численные результаты

Рассмотрим случай приложенной к штампу постоянной нагрузки P_0 и постоянного распределенного по кольцевой области давления q_0 . Тогда $\bar{q}(t) = q_0 J(t)$ и $\bar{P}(t) = P_0 J(t)$. Для описания же механического поведения материала слоя возьмем модель стандартного вязкоупругого тела, для которой функция ползучести имеет следующий вид [8]

$$J(t) = \frac{T_\varepsilon}{E_0 T_\sigma} \left(1 - \left(1 - \frac{T_\sigma}{T_\varepsilon} \right) e^{-\frac{t}{T_\varepsilon}} \right), \quad (8)$$

где E_0 – мгновенный модуль упругости, а T_σ и T_ε – времена релаксации и ползучести. Подставляя выражение (8) в выражения (6) и (7), можно определить явный вид зависимости глубины внедрения штампа в слой от времени.

На рис. 2 и рис. 3 представлены зависимости от времени внедрения $d(t)$ для трех значений величины пригрузки (рис. 2) и трех значений внешнего радиуса кольцевой области ее приложения (рис. 3). На рисунках черными линиями также показан случай отсутствия пригрузки. Для удобства были введены следующие обозначения: $E_0^* = E_0/(1-\nu^2)$, $T = T_\varepsilon/T_\sigma$. Из результатов следует, что наличие пригрузки приводит к увеличению величины внедрения штампа при той же величине приложенной к нему силы. При этом, чем больше величина пригрузки и чем больше площадь кольцевой области ее приложения, тем глубже будет погружен штамп в слой.

Влияние пригрузки будет также различным, если варьировать внутренний радиус кольцевой области. Анализ влияния a_1 на зависимость $d(t)$ показал, что чем больше расстояние между границей области контакта и внутренней границей кольцевой области, тем меньше влияние пригрузки.

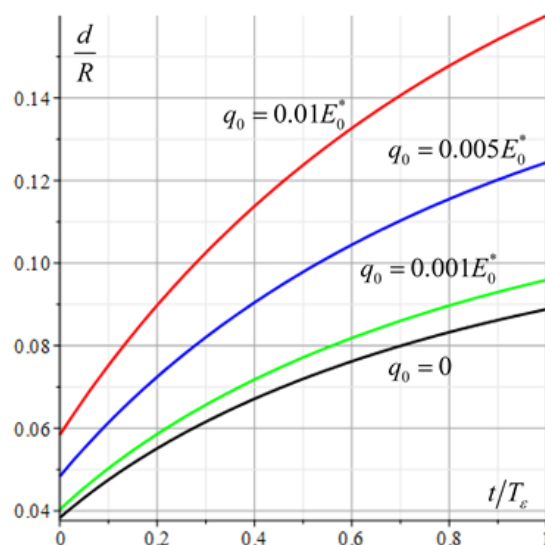


Рис. 2. Зависимость $d(t)$ для разных значений q_0 при $T = 5$, $a_2 = 2a_1 = 2R$ и $P_0 = 0,01E_0^*/R^2$

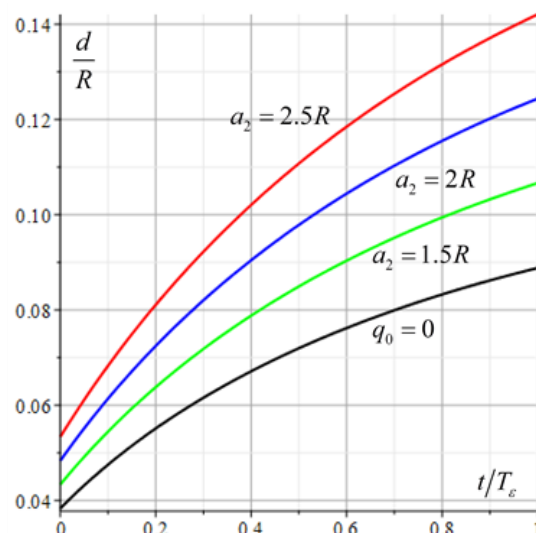


Рис. 3. Зависимость $d(t)$ для разных значений a_2 при $T = 5$, $a_1 = R$, $q_0 = 0,005E_0^*$ и $P_0 = 0,01E_0^*/R^2$

Оценка приближенной формулы

Уточнение полученных результатов с учетом конечной толщины слоя можно сделать, удержав в формуле (3) несколько первых членов ряда.

Найдем сначала уточненную формулу для смещения границы слоя $w_2(r, t)$ вследствие действия пригрузки. Оставив первые три члена в ряде (3), получим следующую поправку $\Delta w_2(r, t)$ к выражению (5) с точностью до $O(a_2^5/h^5)$

$$\Delta w_2(r, t) = -2(1-\nu^2)q_0 J(t) \cdot$$

$$\left(\left(b_{00} + b_{01} \frac{r^2}{h^2} \right) \frac{a_2^2 - a_1^2}{2h} + b_{10} \left(\frac{a_2^4 - a_1^4}{4h^3} \right) \right). \quad (9)$$

На рис. 4 представлена величина относительной ошибки $\Delta w_2/w_2$ для разных точек внутренней части кольцевой области в зависимости

от отношения толщины слоя к внешнему радиусу кольцевой области. Эта величина будет одинакова для всех моментов времени. Коэффициенты b_{ij} брались для случая, когда слой лежит на жестком основании без трения. Из результатов следует, что наибольшее изменение в результате поправка $\Delta w_2(r, t)$ вносит для точки с координатой $r = 0$. Из результатов расчетов также следует, что для толщин слоя, больших $6a_2$, максимальный прогиб в центральной точке по уточненной формуле меньше того значения, что дает модель полупространства, на величину, не превосходящую 10%.

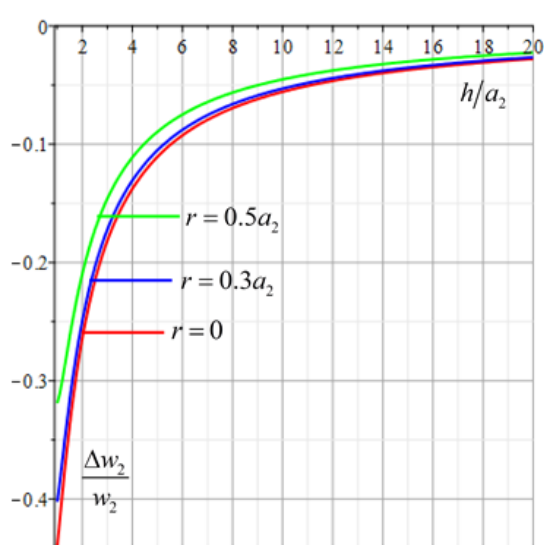


Рис. 4. Зависимость величины $\Delta w_2/w_2$ для разных точек границы слоя внутри кольцевой области с $a_1 = 0.5a_2$

В работе [9] исследованы смещения границы упругого слоя варьируемой толщины h под действием равномерно распределенного по кругу радиуса a давления. В частности, показано, что в случае отсутствия трения между слоем и жестким основанием, смещение центральной точки границы слоя с толщиной $h = 7a$ отличается от результата, полученного для упругого полупространства, примерно на 8%.

Таким образом, для слоев, толщина которых имеет порядок десяти радиусов области приложения нагрузки, модель полупространства будет давать результат с ошибкой лишь в несколько процентов. Заметим, что порядок погрешности зависит также от способа крепления слоя к подложке, а в случае полного сцепления слоя с основанием и от значения коэффициента Пуассона материала слоя.

Выводы

В проведенном исследовании построена модель внедрения в вязкоупругий толстый слой сферического штампа при наличии вне области контактного взаимодействия осесимметричной пригрузки. Полученное аналитическое решение контактной задачи позволило исследовать влияния параметров пригрузки (величины пригрузки, площади области ее приложения, близости к пятну контакта) на зависимость глубины внедрения штампа в слой.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки эффекта взаимного влияния пятен контакта на сближение тел с шероховатыми поверхностями. Учет в построенном решении вязкоупругих свойств материалов делает модель применимой для исследования контакта тел, обладающих реологическими свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 18-19-00574-П).

- [1] Hertz Н. Über die Berührung fester elastischer Körper // Journal für die reine und angewandte. – 1882. – № 92. – P. 156-171.
- [2] Неклассические смешанные задачи теории упругости / Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
- [3] Теория линейной вязко-упругости / Бленд Д.; Перевод с англ. И.И. Гольберга и Н.И. Малинина; Под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Мир, 1965. – 199 с.
- [4] Александров В.М. Некоторые контактные задачи для упругого слоя // Прикладная математика и механика. – 1963. – Т. 27. – № 4. – С. 758-764.
- [5] Механика контактного взаимодействия / Джонсон К.; Перевод с англ. В.Э. Наумова и А.А. Спектора; Под ред. Р.В. Гольдштейна. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
- [6] Lee E.H., Radok J.R.M. The contact problem for viscoelastic bodies // Journal of Applied Mechanics. – 1960. – V. 27. – № 3. – P. 438-444.
- [7] Контактная задача теории упругости / Штаерман И.Я. – Л.: Гостехтеориздат, 1949. – 270 с.
- [8] Элементы наследственной механики твердых тел / Работнов Ю.Н. – М.: Наука, 1977. – 384 с.
- [9] Егоров К.Е. К вопросу деформаций основания конечной толщины // Механика грунтов. – 1958. – № 34. – С. 12-29.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ СЕМЕНОВ	3
СЕМЕНОВ А.П. ГЛАЗАМИ ДОЧЕРЕЙ	
Семенова Н.А.	5
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЫ АРМИРОВАННОЙ СТАЛЬЮ ИЛИ БАЗАЛЬТОМ	
Абрамов К.А., Шолом В.Ю., Поляков А.Б., Кодиров И.С.	9
УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ	
Алисин В.В., Рощин М.Н., Лукьянов А.И.	12
ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ GLW ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСЕЛ	
Антошкин И.Ф., Алексеев А.П., Мусьякаев Р.З.	15
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИЛЬТРА МАСЛА GLW FS50	
Антошкин И.Ф., Алексеев А.П., Мусьякаев Р.З.	19
АБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ	
Афанасьева Л.Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В., Барчуков Д.А.	22
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ МОТОРНОГО МАСЛА В КАЧЕСТВЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ	
Бакулина В.Д., Корнеев С.В.	26
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩЕГО ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ТРИБОХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИТА В УЗЛАХ ТРЕНИЯ	
Балькова Т.И., Пикина А.М., Лапсарь О.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С.	29
ВЛИЯНИЕ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ	
Барчуков Д.А., Измайлов В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е.	32
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФфуЗИИ И АДСОРБЦИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ	
Батова Л.В., Новиков В.В.	35
ВЛИЯНИЕ ГРУППОВОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА ОТРАБОТАННЫХ НЕФТЯНЫХ МАСЕЛ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТИЕВЫХ СМАЗОК	
Белинов М.А., Гончарова М.А. Соловьев В.В., Соколов А.В., Данилова А.С.	39
БЕЗЗОЛЬНЫЕ ТИО-И ДИТИОФОСФАТНЫЕ ПРИСАДКИ, СНИЖАЮЩИЕ ТРЕНИЕ И ИЗНОС	
Белинов М.С., Малышкина О.В., Гончарова М.А., Соловьев В.В., Соколов А.В.	42
ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФАЗЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ	
Бирюков В.П.	46
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ПРИСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА К МАСЛАМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТРЕНИЯ	
Бирюков В.П., Принц А.Н., Корноухов А.П.	49
ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕ В ВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМАХ КАЧЕНИЯ С ЛЮФТОМ	
Блинов Д.С., Морозов М.И.	53

ТВЕРДЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ-ОРИЕНТАНТЫ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ	
Большаков А.Н.	57
О ПОНЯТИИ УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТРИБОСИСТЕМ	
Бородай А.В., Скринников Е.В.	60
ТВЁРДОСМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ	
Броновец М.А.	64
СПОСОБ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ	
Быкова А.Д., Марков М.А., Кравченко И.Н.	68
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПУМА С ПРИСАДКАМИ В СИСТЕМЕ ГРЕБЕНЬ КОЛЕСА-РЕЛЬС	
Ващишина А.П., Ващишин С.П.	73
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФРИКЦИОННОГО МИКРОКАПИЛЛЯРА В УСЛОВИЯХ ПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ С ГРАНИЧНЫМ ТРЕНИЕМ	
Веденеев М.С., Единов Д.Д., Новиков В.В.	77
ПРОВЕРКА СТАБИЛЬНОСТИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	
Войнов К.Н.	80
ВЛИЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРОЦЕСС СВЕРЛЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА	
Волосова М.А., Федоров С.В., Тет У, Колосова Н.В.	83
НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ	
Гадолина И.В., Пугачев М.С.	87
АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЯ TiN ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	
Газизова М.Ю., Смирнов Н.А., Кудряшов С.И., Шугуров В.В., Ахмадеев Ю.Х.	91
РЕАЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА В ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЯХ СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН	
Гайдар С.М., Ерохин М.Н., Наджи Наджм А.Ф., Пикина А.М.	94
ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ КАНАТНЫХ СМАЗОК. СРАВНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ, СМАЗАННЫХ ИМПОРТНОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КАНАТНЫМИ СМАЗКАМИ	
Головин В.П., Крамер О.Л., Шолом В.Ю., Филатов М.В.	98
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НАНОПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И ПОЛИВИЛИДЕНФТОРИДА	
Горох Г.Г., Тураходжаев Н.Д., Лозовенко А.А., Федосенко В.С., Иджи М.М.	101
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТРЕНИЯ МЯГКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА	
Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю.	104
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С КОМПОЗИЦИОННЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ	
Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш., Гусев А.С.	107

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВВЕДЕНИЯ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРИСАДОК К БИОДЕГРАДИРУЕМЫМ ПЛАСТИЧНЫМ СМАЗКАМ	
Григорьев Ф.А., Ковалева И.Н., Марченко Л.Н., Подгорная В.В.	111
Трибологические свойства покрытий MoS _x , формируемых реакционным лазерным осаждением	
Грицкевич М.Д., Фоминский В.Ю., Романов Р.И. Фоминский Д.В.	114
линейная гармоническая аппроксимация трибодетформационного процесса деталей строительной техники	
Густов Ю.И., Воронина И.В.	118
РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АНТИФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВМПЭ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОБАВОК	
Данилова С.Н., Васильев А.П., Дьяконов А.А., Оконешникова А.В., Макаров И.С., Охлопкова А.А.	121
СТАТИЧЕСКАЯ ГРАДУИРОВКА ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОЙ ПЛЕНКИ	
Даровской Г.В., Поляков В.Н.	125
ОСОБЕННОСТИ ФРЕТТИНГ-ПРОЦЕССА ВО ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ	
Дубинова О.Б., Елагина О.Ю.	128
ПОЛУЧЕНИЕ И ВЛИЯНИЕ ФЕРРИТА НИКЕЛЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОК	
Задошенко Е.Г.	131
АДГЕЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ НЕРОВНОСТЕЙ	
Измеров М.А., Тихомиров В.П.	134
НОВЫЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Казаков А.М., Шолом В.Ю., Крамер О.Л., Корнилова А.П., Пшеничная М.А., Поплавский И.В.	137
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СВЕКЛОСАХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Карцев С.В., Кравченко И.Н., Карцев И.С.	140
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ В ЗОНЕ КОНТАКТА С РЕЛЬСАМИ КОЛЕС КАРЬЕРНЫХ ЛОКОМОТИВОВ НА ИХ ТЯГОВУЮ СПОСОБНОСТЬ	
Керопян А.М.	143
Трибологические свойства многослойных покрытий CrN/TiN на медно-бериллиевом сплаве, нанесенных методом вакуумно-дугового осаждения, при трении в режиме граничной смазки	
Колубаев А.В., Сизова О.В., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Терюкалова Н.В., Новицкая О.С., Белый А.В.	147
ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСМИССИОННОГО МАСЛА ТМ5-18	
Коноплев В.Е., Пикина А.М., Лапсарь О.М., Ветрова С.М.	151
ИСПЫТАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ КОЛЕБАНИЙ	
Копейкин А.И., Малафеев С.С., Малафеева А.А.	154
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭЛАСТОМЕРОВ ПРИ КОНТАКТНО-ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	
Копченков В.Г.	158

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛАХ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	
Корнеев С.В., Большаков Р.С.	162
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛАСТОМЕРОВ	
Королев П.В., Шилов М.А.	166
ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ	
Короткевич С.В., Буяновский И.А.	170
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ГРАДИЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ» ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ	
Крнев Л. И., Айзикович С.М., Николаев А.Л.	173
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СПЕЧЕННОГО ПОРОШКОВОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА Fe-ОСНОВЕ В ДИСКОВОМ ОСТАНОВОЧНОМ ТОРМОЗЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ ИНЕРЦИОННОМ СТЕНДЕ	
Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.	177
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ ОТ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ АЗОТИРОВАНИЯ	
Куксенова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А.	181
СЦЕПЛЕНИЕ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ЧАСТИЧНОМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИИ	
Любичева А.Н., Цуканов И.Ю.	185
ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА АКТИВАЦИИ ТРЕНИЯ ЛОКОМОТИВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ	
Майба И.А.	188
КОРРЕКЦИЯ В МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЕ ОТКРЫВАНИЯ ДНИЩА КОВША ЭКСКАВАТОРА	
Малафеев С.И., Малафеева А.А.	191
ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР В ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ СТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ СМАЗЫВАНИЕМ	
Маленко П.И.	194
КОНТУРЫ ДЕГЕЗИОННО-ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ	
Марков Д.П.	198
НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ.	
Марченко Е.А., Петрова И.М.	202
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ МОРОЗОСТОЙКОЙ ПОЛУЖИДКОЙ СМАЗКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИММОТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В БОРТОВЫХ РЕДУКТОРАХ ТЕХНИКИ	
Матина О.С., Волгин С.Н.	204
РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ТЕЛАХ ТРЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЕМНОГО КОНТАКТА	
Мельник М.А.	207
УЛУЧШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИРОВАНИЕМ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ АРГОНА	
Метель А.С., Мельник Ю.А., Мустафаев Э.С.	211

ИЗНАШИВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА SnSbCu, СФОРМИРОВАННЫХ НА СТАЛЬНЫХ ПОДЛОЖКАХ ПРОЦЕССОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ	
Михеев Р.С., Калашников И.Е., Быков П.А., Катин И.В., Кобелева Л.И.	215
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТРОТУАРНЫХ ПЛИТ НА СТАТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ	
Морозов А.В.	218
К ВОПРОСУ ОБ УЧЁТЕ ТРЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ РЕСУРСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС	
Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А., Полежаев Э.Р.	222
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ПРОГРАММЕ QFORM ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И УСЛОВИЙ ТРЕНИЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ ПОКОВКИ «ПОДШИПНИК»	
Мышечкин А.А., Скрипник С.В., Белоусов И.В.	226
ЗЕЛЕНАЯ ТРИБОЛОГИЯ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ	
Мышкин Н.К., Григорьев А.Я.	229
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ЭЛАСТОМЕРНОГО УПЛОТНЕНИЯ С МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ СМАЗКОЙ	
Палин Д.Ю., Топоров А.В.	231
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОКНОАРМИРОВАННЫХ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ КОМПОЗИТОВ	
Панова М.О., Буяев Д.И., Шапошникова В.В., Соловьёва В.А., Любимова А.С.	234
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТОЧЕЧНОГО УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА С УЧЁТОМ МАССЫ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ	
Пановко М.Я.	237
СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АЛМАЗ – КАРБИД КРЕМНИЯ	
Перевислов С.Н.	241
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВ ВОДОСМЕШИВАЕМЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК	
Пилюгин С.М., Шолом А.В., Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г.	244
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТЕРМОСТОЙКИМИ ТЕРМОПЛАСТАМИ	
Полунин С.В., Горбунова И.Ю., Шапошникова В.В., Панова М.О., Морозова П.А.	247
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЛАТУНИ	
Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.	251
АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ФРЕТТИНГ-ШУМА, АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	
Скворцов О.Б.	254
ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Скворцов О.Б.	258
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СТЕНДОВ	
Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н.	261
МИКРОСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ТРЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Столяров В.В.	265

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЗАГУЩЕННЫХ СУЛЬФОНАТОМ КАЛЬЦИЯ ССК-400	
Стрельникова С.С., Самусенко В.Д., Татур И.Р., Кальянова О.А., Щербаков Ю.И.	268
ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ПРОЦЕСС ОСАДКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ	
Тохметова А.Б., Албагачиев А.Ю., Скрипник С.В.	271
ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ	
Усов П.П.	274
О ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ НАУЧНЫХ ГИПОТЕЗ СХВАТЫВАНИЯ	
Федоров С.В.	278
ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ НОВЫХ СОСТАВОВ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ СТЕРЖНЕЙ РАПС В ТРИБОКОНТАКТЕ «КОЛЕСО-РЕЛЬС»	
Фейзова В.А., Озябкин А.Л.	282
ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИСАДКИ Cu_2O НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СМАЗОЧНЫХ СЛОЁВ ПРИ ТРЕНИИ В СРЕДЕ ВАЗЕЛИНОВОГО МАСЛА	
Фоминов Е.В., Задощенко Е.Г., Шучев К.Г.	286
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МАГНЕТРОННОГО НАНЕСЕНИЯ MoS_2+Ti И СУСПЕНЗИОННЫХ НА ОСНОВЕ MoS_2 ДЛЯ УСЛОВИЙ НОРМАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ	
Хопин П.Н.	289
А.П. СЕМЕНОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ С АЛМАЗОПОДОБНОЙ И НАНОКОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРОЙ	
Хрущов М.М.	292
ВЛИЯНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕРОВНОСТЕЙ НА ФАКТИЧЕСКУЮ ОБЛАСТЬ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ УПРУГИХ ТЕЛ	
Цуканов И.Ю.	296
ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДАЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛЯНЫХ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	
Шолом А.В., Пилюгин С.М., Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г.	299
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И ОКСИДОКЕРАМИКИ, ДОПИРОВАННЫХ ФУЛЛЕРЕНАМИ	
Шпилевский Э.М., Филатов С.А.	303
ГЛУБОКАЯ ВЫТЯЖКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕВИТАМЕТАЛЛИЗАНТА РВ-18 В ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ	
Шульга Г.И., Колесниченко А.О., Лебединский И.Ю., Скрипников Е.В., Черников Н.С., Самойленко М.Н.	306
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА	
Щербакова С.С., Легостаева А.П., Антипова И.А., Дроган Е.Г.	310
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРИГРУЗКИ НА ВНЕДРЕНИЕ ШТАМПА В ВЯЗКОУПРУГИЙ СЛОЙ	
Яковенко А.А., Горячева И.Г.	313