



*Российская Академия Наук*



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Российская академия наук  
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

**Международная конференция  
«МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И  
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО  
МАШИНОСТРОЕНИЯ»,  
посвященная 85-летию  
Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН**

**Навстречу 300-летию Российской академии наук**

**23 ноября 2023 года**

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ КОНФЕРЕНЦИИ**

**Москва  
2023**

УДК 531

Международная конференция «МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ», посвященная 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сборник тезисов международной научной конференции под ред. акад. Ганиева Р.Ф. - М., ИМАШ РАН, 2023, -262 с.

**Аннотация**

В сборнике приведены тезисы докладов международной конференции «МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ», посвященной 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН., Москва, 23 ноября 2023 года.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2023

ISBN 978-5-904282-18-9



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Российская академия наук  
Отделение энергетики, машиностроения, механики  
и процессов управления РАН  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

**Международная конференция**  
**«МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И**  
**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО**  
**МАШИНОСТРОЕНИЯ»**,  
*посвященная 85-летию*  
*Института машиноведения*  
*им. А.А. Благонравова РАН*

*Навстречу 300-летию Российской академии наук*

23 ноября 2023 года

*СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ КОНФЕРЕНЦИИ*

**МОСКВА**

**2023**

*Международная научная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения»*

## **Программный комитет:**

**Почетный председатель:**

**Ганиев Ривнер Фазылович**, академик РАН, научный руководитель ИМАШ РАН

**Председатель:**

**Глазунов Виктор Аркадьевич**, д.т.н., д.филос.н., профессор, директор ИМАШ РАН

**Заместитель председателя:**

**Юдкин Владимир Федорович**, к.т.н., ученый секретарь

**Члены комитета:**

**Ганиев Олег Ривнерович**, чл.-корр. РАН, директор НЦ НВМТ РАН

**Ерофеев Михаил Николаевич**, д.т.н., профессор, зам. директора ИМАШ РАН по научной работе

**Махутов Николай Андреевич**, чл.-корр. РАН, профессор

**Украинский Леонид Ефимович**, чл.-корр. РАН, профессор, зам. директора НЦ НВМТ РАН

## **Организационный комитет:**

**Председатель:**

**Глазунов Виктор Аркадьевич**, д.т.н., д.филос.н., профессор, директор ИМАШ РАН

**Заместители председателя:**

**Филиппов Глеб Сергеевич**, д.т.н., зам. директора ИМАШ РАН по научной работе

**Юдкин Владимир Федорович**, к.т.н., учёный секретарь ИМАШ РАН

**Члены комитета:**

**Киреев Иван Дмитриевич**, заместитель директора ИМАШ РАН по общим вопросам

**Петюков Эдуард Николаевич**, начальник отдела кадров - заместитель директора ИМАШ РАН по управлению персоналом

**Албагачиев Али Юсупович**, д.т.н., профессор, зав. отделом «Трение, износ, смазка. Трибология»

**Бобровницкий Юрий Иванович**, д.ф.-м.н., зав. отделом «Теоретическая и прикладная акустика»

**Косарев Олег Иванович**, д.т.н., зав. отделом «Виброакустика машин»

**Кузнецов Юрий Степанович**, д.т.н., профессор, зав. лабораторией «Лаборатория волновых процессов в бурении нефтяных и газовых скважин»

**Матвиенко Юрий Григорьевич**, д.т.н., профессор, зав. отделом «Прочность, живучесть и безопасность машин»

**Романов Александр Никитович**, д.т.н., профессор, зав. отделом «Конструкционное материаловедение»

**Саберов Хайяр Фейзрахманович**, к.т.н. зав. отделом ОНТИПиВ

**Сайфуллин Инсаф Шарифуллович**, д.х.н., профессор, зам. научного руководителя ИМАШ РАН

**Соловьев Виктор Олегович**, д.т.н., зав. отделом «Вибрационная биомеханика»

## **Организаторы конференции:**

Министерство науки и высшего образования РФ; Российская академия наук;  
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН;  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

## *Оглавление*

Секция №1 .....	16
Аверьянов А.П., Султанова И.И., Урманчеев В.И. Волновая технология получения пересыщенного седиментационно-устойчивого солевого раствора повышенной плотности для глушения скважин .....	17
Аветисян Г.Р. Управление волновыми и колебательными процессами в магистральных газопроводах с целью повышения точности измерения расхода и количества газа.....	18
Аветисян Г.Р., Гаспарян А.С., Симонян А.А., Абгарян В.Л. Управление волновыми и вибрационными процессами в трубопроводных системах применительно к установкам измерения количества отбора воды из водоканалов и водных бассейнов .....	19
Алифов А.А. Смешанные вынужденные и параметрические колебания при нелинейном параметрическом возбуждении .....	20
Артамонов В.Ю., Крюков А.И., Султанова И.И. Разработка волновой технологии интенсификации приготовления буровых суспензий на углеводородной основе. ....	21
Артамонов В.Ю., Султанов Д.Р., Шульгина А.П. Интенсификация обработки глинистых суспензий.....	22
Велиев Е. И., Ганиев Р. Ф., Корнеев А. С., Украинский Л. Е. Волновые гидромассажиры.....	23
Ганиев О.Р., Шамов Н.А., Султанов Д.Р., Султанова И.И. Волновые процессы в технологии спуска и цементирования обсадной колонны.....	25
Ганиев Р.Ф., Ганиев О.Р., Шамов Н.А. Высокооборотное ударное бурение скважин при одновременном создании волн давления на забое .....	27
Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Гришняев И.Н., Чукаев А.Г., Фельдман А.М., Жебынев Д.А. О возможности применения пароводяного генератора колебаний для повышения эффективности добычи сверхвязкой нефти .....	30
Ганиев С.Р. Волновые технологии в процессах строительства нефтяных и газовых скважин. ....	31
Ганиев С.Р., Касилов В.П., Кислогубова О.Н., Бутикова О.А., Кочкина Н.Е. Применение волновых резонансных воздействий для интенсификации гидролиза крахмала под действием $\beta$ -амилазы .....	32
Ганиев С.Р., Кузнецов Ю.С., Пустовгар А.П., Султанов Д.Р. Волновая технология приготовления тампонажных растворов для цементирования скважин .....	34
Ганиев С.Р., Шмырков О.В., Рудаков В.П., Курменев Д.В., Крюков А.В. Характеристики волнового гидродинамического генератора плоского типа при изменении степени перекрытия потока цилиндрическими телами обтекания и давлении перед и за ними. ....	35

Дубинский Г.С., Чибисов А.В., Андреев В.Е., Исследование технологии стимуляции пласта и увеличения нефтеотдачи с использованием волновых процессов и резонанса в продуктивных пластах.....	36
Ерофеев В.И. Вибрационная генерация ультразвука в нелинейно-упругих и нелинейно-вязкоупругих средах при условии фазово-группового синхронизма низкочастотных и высокочастотных волн .....	37
Ерофеев В.И., Пановко Г.Я., Плехов А.С. Динамическое виброгашение в электрогенераторных установках переменной частоты вращения.....	38
Ильгамов М.А. Теория углеродных микро- и нанорезонаторов .....	39
Конев Е.М. Анализ состояния сложных технических систем при оценке динамических процессов с использованием бинарной нейронной сети.....	40
Кузнецов Р.В., Шандрыгин А.Н, Рогов Е.А., Шишляев В.В. Гидродинамическое моделирование трещин гидравлического разрыва пласта в низкопроницаемых трещинных коллекторах газовых залежей .....	42
Кузнецов Ю.С., Кузнецов Р.Ю., Султанов Д.Р. Уникальная волновая технология получения сверхтяжёлых седиментационно-устойчивых буровых растворов.....	43
Кукарских Л.А., Трифонов Г.И. Распространение поперечной волны в стохастической среде.....	44
Кушнир А.П. Волновые процессы в уплотнениях высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков .....	45
Кушнир А.П. Система мониторинга динамических параметров станков с ЧПУ .....	46
Лян И.П. Поддержание резонансных режимов работы вибрационных машин при переменных параметрах технологической нагрузки.....	47
Можаровский В.В., Киргинцева С.В. Определение параметров гидроудара для труб из композитов.....	48
Никифоров А.Н. Методология определения контактных сил в случае прерывистой обкатки ротором статора.....	50
Новоженова О. Г. Определение спектров релаксации напряжения в композитах. Часть II. Нелинейная вязко - упругость .....	52
Овчинников П.В. Актуальные направления исследований с целью повышения эффективности строительства скважин.....	53
Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И. Исследование свойств минерального порошка, подвергнутого ступенчатой волновой обработке .....	54
Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И. Модификация порошка минерального материала на основе гипса с помощью нелинейной волновой технологии.....	55
Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И. Исследование свойств порошка гипсового вяжущего, подвергнутого ступенчатой волновой обработке .....	56

Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И., Довбненко М.С. Исследования возможности резонансного волнового воздействия на степень пропитки стекловолокна связующим на основе полиэфирных смол .....	57
Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И., Довбненко М.С. Исследования волнового перемешивания компонентов стеклонаполненного композита с помощью волнового гидродинамического смесителя.....	58
Петухов С.В., Свирин В.И. Волновая деятельность био-антенных решеток и наследуемые биомеханические феномены.....	59
Разумовский И.А., Одинцев И.Н., Чернятин А.С. Анализ динамических процессов с использованием оптико-интерференционных и оптико-цифровых методов .....	60
Рогов Е.А. Самоотклоняющаяся кислотная композиция.....	63
Рогов Е.А., Жирнов Р.А., Кузнецов Р.В., Полозков К.А. Опыт применения технологии плазменно-импульсного воздействия на пласт .....	65
Сайфуллин И.Ш. Внедрение технологий нелинейной волновой механики в нефтепереработку - путь к модернизации производств НПЗ и НПХ. ....	66
Соловьев А.А., Валувев А.М. Волновые стохастические процессы городского трафика и методы эффективного управления ими с учетом требований безопасности.....	67
Терехов А.Л. Обзор результатов исследований и внедренных технических решений по снижению шума в газовой промышленности .....	68
Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю. Способ плазменного напыления композитных покрытий.....	69
Трифонов Г.И., Кравченко И.Н. Способ получения композиционного материала для напыления заданной фракции.....	70
Украинский Л.Е., Довбненко М.С., Панин С.С. Исследование динамики несбалансированного ротора асинхронного двигателя при внешней периодической нагрузке.....	71
Украинский Л.Е., Шамов Н. А., Устенко И.Г. Анализ результатов исследований процессов волнового и струйного способов кольматации .....	72
Утяшев И.М., Шакирьянов М.М. Пространственные колебания изогнутого трубопровода.....	75
Шамов Н.А. Механизм взаимодействия высокоскоростных коротких струй жидкости с жесткой преградой .....	76
Шульженко А.А., Модестов М.Б. Реакция человека на воздействие длинноволновых инфракрасного диапазона сигналов тканых электронагревателей .....	79
Секция №2 .....	80
Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Механические и трибологические свойства латунных покрытий, полученных газодинамическим напылением .....	81

Ахметханов Р.С. Исследование распределений локальных деформаций тепловым методом контроля .....	82
Ахметханов Р.С. Исследование влияния укладки армирования композиционного материала на неоднородность деформаций .....	83
Власов Д.Д. Топологическая оптимизация элементов конструкций, изготовленных с помощью аддитивных технологий.....	84
Власов Д.Д., Поляков А.Э., Татусь Н.А. Адгезионные характеристики композиционных материалов, изготовленных методами аддитивных технологий....	85
Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Моделирование информационной эффективности диагностирования с использованием нечетких методов .....	86
Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Оценка надежности оператора с помощью нечетких методов.....	87
Евдокимов А.П. Несущая способность резинокордных оболочек с двумя монослоями корда.....	88
Елеонский С.И., Писарев В.С., Зайцев М.Д. Количественное описание процесса повреждаемости при циклическом нагружении композиционной пластины с отверстием .....	89
Ерпалов А.В., Хорошевский К.А., Гадолина И.В., Румянцева Е.А. Оценка долговечности конструкций при нестационарном случайном нагружении с применением метода вариационной модовой декомпозиции .....	90
Завойчинская Э.Б., Плотников А.С. Определение неоднородных остаточных напряжений по тангенциальным компонентам вектора перемещений.....	91
Зацаринный В.В. Развитие вероятностных методов исследований и расчётов в малоцикловой усталости .....	92
Кукшинов А.И., Маслов С.В., Шубина Н.А. Прогнозирование порога развития усталостных трещин в элементах железнодорожных конструкций. Опыт и перспективы применения методов экспериментального контроля напряжённого состояния термоядерных установок, эксплуатируемых при криогенных температурах .....	93
Лебединский С.Г. Прогнозирование порога развития усталостных трещин в элементах железнодорожных конструкций .....	94
Макаренко И.В., Макаренко Л.В. Закономерности нелинейных процессов разрушения Аустенитной стали в широком диапазоне номинальных напряжений и температур .....	95
Маслов С.В. Расчётно-экспериментальное исследование напряженного состояния методом натурной тензометрии с применением алгоритмов решения обратных задач .....	96
Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Исследование несущей способности перспективной сетчатой конструкции беспилотного летательного аппарата .....	97



Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Применением акустико-эмиссионной диагностики при испытаниях стрингеров на трехточечный изгиб.....	98
Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Структурно-феноменологическая концепция и акустико-эмиссионный мониторинг несущей способности изделий.....	99
Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Диагностика консоли крыла планера мс–21 в зоне ударного воздействия с применением акустической эмиссии .....	100
Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Баландин Т.Д. Оценка погрешности применения стандартного алгоритма планарной локации источников акустической эмиссии .....	101
Матвиенко Ю.Г., Кузьмин Д.А. Обоснование допустимости изменения объемов и периодичности эксплуатационного неразрушающего контроля оборудования и трубопроводов второго контура АЭС С РУ ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.....	102
Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Мониторинг деформированного состояния материала конструкционных сталей по потоковым параметрам локационных импульсов в режиме нагружения изделий .....	103
Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Скворцов Д.Ф. Изучение возможностей применения и вибродиагностики для мониторинга состояния конструкционного материала в процессе его структурной перестройки .....	104
Махутов Н.А., Гаденин М.М. Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности и защищенности эксплуатации высоконагруженных машин.....	105
Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Разработка методологии мониторинга вязких и хрупких разрушений структурных связей в процессе деформирования конструкционных сталей и сплавов .....	107
Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А. Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций, изготавливаемых с использованием аддитивного производства .....	108
Москвичев В.В. Прикладные исследования прочности, ресурса и безопасности сложных технических систем.....	109
Наумов О.В., Москвитин Г.В. Исследование НДС рамных конструкций квадрокоптеров .....	110
Новоженова О.Г. Развитие наследственной механики Ю.Н. Работнова.....	111
Одинцев И.Н. Оптимальная процедура исследования нелинейных деформационных процессов с использованием электронной спекл-интерферометрии .....	112
Побегайло П.А., Гадолина И.В. К построению комплексных инженерных онтологий при проектировании машин для открытых горных работ .....	113
Покровский А.М., Матвиенко Ю.Г., Егранов М.П., Захаров П.М. Анализ живучести пластины со сквозной поперечной трещиной нормального отрыва с учетом двухмерного стеснения деформаций по ее фронту .....	114
Полилов А.Н. Модели «сбрасывания» концентрации напряжений в биоподобных композитах.....	115

Разумовский И.А., Усов С.М. К исследованиям полей остаточных напряжений на основе обработки данным измерений деформационных откликов, возникающих при создании единственного разреза .....	116
Северов П.Б. Развитие нелинейности петель гистерезиса однонаправленного углепластика при повторном квазистатическом растяжении .....	117
Склемина О.Ю. Рациональное проектирование структуры армирования для повышения несущей способности композитных баллонов.....	118
Татусь Н.А. Навеянные природой принципы проектирования материалов и конструкций.....	119
Фесенко Т.Н., Дронова Е.А. Оценка влияния нарушений формы поперечных сечений трубопроводов на их прочность .....	120
Секция №3 .....	121
Алимов М.А. Учет поворота волокон в процессе деформирования Косоугольно-армированных углепластиков.....	122
Азиков Н.С., Зинин А.В. Сравнительный анализ критических усилий сжатия и сдвига многоугольных панелей.....	123
Базров Б.М. Элементная база средств технологического обеспечения деталей на модульном уровне.....	125
Гаденин М.М. Критерии оценки изменения долговечности при одно- и двухчастотных режимах нагружения.....	126
Гаденин М.М., Романов А.Н. Влияния релаксационных процессов на накопление повреждений и долговечность конструкционных материалов при малоцикловом нагружении .....	127
Гадолина И.В. Цифровые инструменты в оценке долговечности при переменном нагружении .....	128
Думанский А.М. Определяющие соотношения наследственного типа в механике композитов.....	129
Ким А.А., Лысенко А.М., Томилина Т.М. Конструкционные материалы из лунного реголита: отработка технологии селективного лазерного сплавления.....	130
Китаев Н.И. Пичхидзе С.Я. Технологические особенности формирования параметров качества диффузионного слоя на поверхности стали марки 12ХН3А при микродуговом воздействии.....	132
Козлов Д.А. Применение покрытий на основе меди для повышения эксплуатационных свойств высоконагруженных трибосопряжений .....	133
Козлов Д.А. Влияние режимов ионного легирования медью на работоспособность трибосопряжения из конструкционной стали в условиях трения скольжения .....	134

Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В., Родионов Д.А. Деформационно структурный анализ при интенсификации адгезионных процессов системы «подложка-покрытие» .....	135
Куксенова Л.И., Алексеева М.С. Метод контроля трибологических свойств азотированных конструкционных сталей.....	136
Куксенова Л.И., Савенко В.И. Влияние поверхностно-активной среды на структуру и свойства конструкционных материалов в условиях контактной деформации .....	137
Куприянова М.С. Тензорные методы сжатия данных.....	138
Курзина Е.Г., Кудрявцева В.Д., Амирханов М.Р., Арутюнян А.С. Повышение эффективности виброзащиты высокочувствительного оборудования релейной железнодорожной автоматики.....	139
Мисоченко А.А., Столяров В.В. Применение импульсного тока в процессах деформационной обработки материалов.....	140
Моисеенко В.В., Думанский А.М. Методика построения определяющего наследственного соотношения однонаправленного композита при внутрислойном сдвиге .....	141
Петрова И.М. Некоторые закономерности накопления повреждений при различных видах циклического нагружения и в гигацикловой области .....	142
Петушков В.А. Анализ предельных состояний и ресурса металлических конструкций и изделий из полимерных материалов .....	143
Петушков В.А. Анализ динамики искусственного клапана сердца .....	144
Романов А.Н. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении на стадии образования трещин .....	145
Романов А.Н. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении на стадии распространения трещин.....	146
Столяров В.В., Савенков Г.Г. Влияние структурного измельчения на механические свойства алюминиевой бронзы при динамическом нагружении .....	147
Сахаров А.В. Использование традиционных металлорежущих станков в модульных технологических процессах .....	148
Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Значение виброакустического воздействия в появлении электропластического эффекта .....	149
Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Виброакустическая модель электропластического эффекта .....	150
Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Вибрация электропроводящих элементов оборудования.....	151
Семак А.В., Курзина Н.М., Арутюнян Д.Р., Курзина Е.Г., Колмаков А.Г. Регулирование вибродемпфирующих свойств амортизирующих полимерных элементов железнодорожных инфраструктурных объектов .....	152

Троицкий А. А. Метод оценки технологичности конструкции изделия до технологической подготовки производства .....	153
Фомина Е.И., Худорожко М.В., Думанский А.М. Экспериментальные методы определения пористости материалов с помощью жидкостного экструзионного порозиметра .....	154
Худорожко М.В., Просунцов П.В. Установка концентрированного радиационного нагрева для испытаний высокотемпературных композиционных материалов .....	155
Секция №4 .....	156
Абрамов А.Н., Шолом В.Ю., Тюленев Д.Г., Абрамов К.А., Пилюгин С.М. Модернизированная машина трения .....	157
Албагачиев А.Ю., Михеев А.В., Тананов М.А. Экспериментальное исследование влияния импульсов тока на фреттинг-износ титановых сплавов.....	158
Албагачиев А.Ю., Тохметова А. Численное моделирование температуры смазочного слоя.....	159
Алисин В.В. Трибологические свойства фторопласта в среде гидравлической жидкости АМГ-10.....	160
Бакулина В.Д., Корнеев С.В. Использование изменений кислотно-щелочных характеристик при оценке сроков работоспособности моторных масел в двигателях внутреннего сгорания автомобилей.....	161
Бирюков В.П. Анализ влияния состава шихты с добавками нано карбидов тантала на триботехнические свойства покрытий.....	162
Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Расчет износа керамической детали алмазным инструментом .....	163
Броновец М.А. Конструирование узлов трения космического применения .....	164
Броновец М.А., Яковенко А.А. Международная научная конференция «TRIBOINDIA-2023» .....	165
Буяновский И.А., Стрельникова С.С., Самусенко В.Д., Татур И.Р., Кальянова О.В. Критерий дроздова как оценка защитной способности пластичных смазок .....	166
Буяновский И.А.*, Щербаков Ю.И. Фрэнк Филип Боуден и его контакты с трибологами РАН.....	167
Быков П.А., Калашников И.Е. Поведение при трении композиционных материалов на основе традиционных антифрикционных сплавов АО20-1 И Б83.....	168
Ващишина А.П. Исследование трибологических характеристик пластичного смазочного материала Пума .....	169
Ващишин С.П. Исследование трибологических свойств моторного масла и его влияние на износ и трение .....	170
Войнов К.Н. Новый органический смазочный материал и его трибологические характеристики.....	171

Воронин Н.А. Трибология топокомполитов.....	172
Гайдар С.М., Ветрова С.М. *, Барчукова А.С., Балькова Т.И. Исследование материалов рабочих органов на абразивный износ.....	173
Горячева И.Г., Яковенко А.А. Модели дискретного контакта и их приложения в трибологии.....	174
Денисов О.В., Малышев В.Н. Повышение износостойкости защитного покрытия забойных телеметрических систем .....	175
Ерофеев М.Н., Пухальский В.А., Офицеров О.О. Перспективная схема планетарной фрезерной головки для срезания припусков с крупногабаритных заготовок .....	176
Задошенко Е.Г. Триботехнические свойства ферромагнитных наносуспензий .....	177
Карцев С.В., Кулаков О.И., Святияцук Н.Н. Исследование свойств кремнийорганических покрытий, сформированных на стальной основе плазмохимическим осаждением из паровой фазы .....	178
Керопян А.М. Трибологические методы повышения коэффициента трения взаимодействующих поверхностей тяговых транспортных средств.....	179
Китаев Н. И., Пичхидзе С. Я. Технологические особенности формирования параметров качества диффузионного слоя на поверхности стали марки 12ХНЗА при микродуговом воздействии.....	180
Ковалев А.А., Мокану А.А., Краско А.С., Преображенская Е.В., Кулаков О.И. Повышение износостойкости клапанных уплотнений типа «металл-металл» посредством применения газотермических покрытий.....	181
Копченков В.Г. Расчет кинематики движения частицы при внедрении в поверхность вязкоупругого материала при ударном нагружении .....	182
Корнеев С.В., Дорошенко С.В., Ширлин И.И. Особенности применения мобильного диагностического оборудования для оценки параметров работающих масел .....	183
Короткевич С.В. Проблемы физико-математических и технических наук .....	184
Курцева Е.И., Песковец А.В. Влияние дисперсионной среды на трибологические свойства пластичных смазок на основе алкилфенолятов кальция.....	185
Кушнир А.П. Влияние износостойких покрытий на стойкость металлорежущего инструмента.....	186
Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Колосова Н.В., Оплеснин С.С. Исследование триботехнических свойств высокоэнтропийных покрытий для металлорежущего инструмента.....	187
Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Оплеснин С.С., Тюрина Ю.А. Износостойкость инновационных наноструктурированных покрытий для обработки титановых сплавов .....	188
Мигранов М.Ш., Репин Д.С., Колосов А.Ю., Тюрина Ю.А. Повышение эффективности лезвийной обработки резанием хромоникелевых сплавов.....	189

Морозов А.В. Исследование износостойкости модифицированных квазикристаллами мдо-покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве В95 .....	190
Паренаго О.П. Химия присадок и проблемы экологии.....	191
Песковец А.В., Суровцев А.С., Подстяжонков Е.И. Влияние состава дисперсионной среды на свойства алкилсалицилатных пластичных смазок .....	192
Петрова И.М. Некоторые закономерности накопления повреждений при различных видах циклического нагружения и в гигацикловой области .....	193
Плахотин А. А., Кадырметов А. М., Попов Д. А. Обеспечение равномерности изнашиваемости поверхностей трения деталей плазменным нанесением и упрочнением покрытий переменного состава .....	194
Почес Н. С., Малышев В. Н. Упрочнение резьбы легкосплавных насосно-компрессорных труб формированием МДО-покрытий и применением экологических смазочных материалов .....	195
Прожега М.В., Попорецкий Д.И., Решиков Е.О., Смирнов Н.Н., Константинов Е.О., Коровушкин В.В. Исследование момента сопротивления подшипника с перекрестными роликами при работе в вакууме .....	196
Прожега М.В., Попорецкий Д.И. Смирнов Н.Н., Константинов Е.О., Коровушкин В.В. Исследование трибологических свойств полимеров для аддитивных технологий в вакууме.....	197
Райковский Н.А., Калашников А.М., Садвакасов Д.Х. Анализ путей снижения потерь мощности на трение в перспективных несмазываемых ступенях роторно-пластинчатого типа.....	198
Рощин М.Н. Углеродсодержащие материалы для пар трения аппарата венера.....	199
Сплавский И.С. Условия работы высокооборотного упорного подшипника скольжения .....	200
Столяров В.В. Трение и износ наноструктурных материалов .....	201
Стрельникова С.С., Яковлева В.А., Самусенко В.Д., Буяновский И.А., Крайнева А.А. Исследование трибологических свойств пакетов присадок российского и зарубежного производства для турбинных масел температурным методом.....	202
Трофименко Б.П., Маркелов А.В. Анализ свойств смазочных композиций на водной основе .....	203
Хасьянова Д.У. Исследование фазовых превращений, происходящих в сплаве на основе Т1 и N1 с проявлением эффектов памяти формы и сверхупругости.....	204
Цуканов И.Ю., Любичева А.Н., Буковский П.О. Изменение характеристик контакта при фрикционном разогреве углерод-углеродных композитов .....	205
Чхетиани П.Д., Щербачков Ю.И. Модернизация машины шкода-савина для обеспечения постоянства эпюры давления .....	206

Шолом В.Ю. Новые консервационные и рабоче-консервационные смазочные материалы для вооружения и военной техники.....	207
Шульга Г.И., Самойленко М.Н., Скринников Е.В., Колесниченко А.О. Черников Н.С. Оценка смазочного действия технологических порошковых материалов при волочении прутковых заготовок .....	208
Шульга Г.И., Черников Н.С., Скринников Е.В., Колесниченко А.О., Самойленко М.Н. Оценка антифрикционного действия топокомполитов при вытяжке листовых сталей .....	209
Секция №5 .....	210
Асфандияров Ш.А., Пономарёва С.Н., Томилина Т.М. Анализ вибрационной и ударной прочности научной аппаратуры космических аппаратов .....	211
Асфандияров Ш.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Разработка и исследование ультразвуковой воздушной 128-элементной фокусированной решётки.....	213
Бобровницкий Ю.И. Черное тело и наилучший поглотитель колебаний: моделирование, реализация, применение.....	214
Карпов И.А. Дискретно-временное моделирование колебаний упругих тел в проблеме экспериментальной идентификации демпфирования.....	215
Пономарёва С.Н., Гребенников А.С. Особенности механических воздействий на конструкции научных космических приборов и их практическая реализация .....	216
Секция №6 .....	218
Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Статников И.Н., Фирсов Г.И. Методические основы исследования дефектных состояний и выявления диагностических признаков неисправностей узлов механизмов циклического действия.....	219
Борисов В.А., Ковалева Н.Л. Разработка классификации и синтез ременных и тросовых приводов механизмов для пространственных движений .....	220
Гарин О.А., Хейло С.В., Рашоян Г.В. Механизмы с шестью степенями свободы с попарно параллельными осями приводов .....	221
Горобцов А.С., Скворцов С.А. Адаптивные методы управления локомоцией антропоморфных и зооморфных роботов .....	222
Николаев А.В. Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН .....	223
Панов А.Н., Махутов Н.А. Методология риск-ориентированного проектирования машин.....	224
Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Автоматизация риск-ориентированного проектирования техники.....	225
Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Разработка нормативной базы риск-ориентированного проектирования в машиностроении.....	226
Пащенко В.Н. Теоретическое обоснование и разработка манипуляционных механизмов совместного относительного манипулирования .....	227

Печейкина М. А , Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. Использование экспертных оценок при морфологическом анализе в машиностроении .....	228
Смоленцев А.Н. , Афонин В.Л. , Гаврилина Л.В. Формирование управляющей программы абразивной обработки пера лопаток ГТД при условии увеличения контактной области с инструментом .....	229
Статников И.Н., Фирсов Г.И. Рациональный подход к выбору значений конструктивных параметров проектируемых машиностроительных .....	230
Тулешов А.К., Куатова М.Ж., Тулешов Е.А. Синтез главных рабочих механизмов кривошипных прессов .....	231
Утяшев Ф.З., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимова Н.А. Интенсивная пластическая деформация дисков газотурбинных двигателей из суперсплавов методом давления с кручением в изотермических условиях .....	232
Фирсов Г.И. Использование поляризационных методов для анализа колебательных траекторий деталей машин .....	233
Шалюхин К.А. Разработка задающих устройств для робот-ассистированной хирургии .....	234
Секция №7 .....	235
Банах Л.Я. Колебания систем с динамически-фрактальной структурой .....	236
Валуев А.М., Соловьев А.А. Методы для оптимизации управления автотранспортными потоками в дорожной сети с регулируемыми перекрестками .	237
Кельнер М.С. Исследование эффективности работы пульсирующих взрывных устройств в зависимости от прочности конструкционных материалов корпусов твердотопливных зарядов .....	238
Кельнер М.С. Исследования на динамические нагрузки детонаторов нового поколения.....	239
Лавров В.В., Шилкин Н.С. Исследование электрического взрыва мостиков специальных детонаторов из легкоплавких оловянных составов .....	240
Макаров С.Б. Численное исследование шнекового транспортера в твердотопливном ПВУ для бурения горных пород.....	241
Минаев А.Я. Вибрационная биомеханика опорных взаимодействий в спортивных снарядах .....	242
Никифоров А.Н. О подходе к моделированию системы «ротор-статор» в режиме обкатки.....	243
Петухов С.В., Свиринов В.И. Фрактало-подобные структуры в биомеханике и системе генетического кодирования .....	244
Ракчеева Т.А. Полиполярная аппроксимационная система координат.....	245
Сахвадзе Г.Ж. Особенности использования технологии лазерного ударного упрочнения при наличии в материале предварительных напряжений .....	246



Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г. Применение технологии лазерной ударной формовки в машиностроении .....	247
Саяпин С.Н. Энергопоглощающее кресло с обратимой адаптацией.....	248
Степанян И.В., Леднев М.Ю. Молекулярно-генетические алгоритмы представления информации .....	249
Шведов И.М. Моделирование оптимальных параметров работы импульсных твердотопливных генераторов ударных волн .....	250
Шведов И.М., Жоау А.А. Концептуальный подход к использованию взрывореактивных комплексов для формирования отвалов в условиях высокой обводненности породного массива .....	251
Шохин А.Е., Крестниковский К.В., Пановко Г.Я. Экспериментальный анализ колебаний виброплатформы с обрабатываемым материалом при её контакте с упругим ограничителем .....	252
Явелов И.С., Рочагов А.В., Жолобов А.В. Развитие методов и средств пульсометрии .....	253
Секция №8 .....	254
Бырдин В.М., Пузакина А.К. О продольных осесимметричных модах вибро- и гидроакустики цилиндрической трубы .....	255
Жиркевич В.Ю. Оценка эффективности метода SMART комплекса ANSYS.....	256
Косарев О.И. Излучение цилиндрической оболочки в жидкости при произвольном рспределении колебательной скорости .....	257
Назолин А.Л. Арбитражная методика измерительного контроля крутильных колебаний роторных машин .....	258
Нахатакян Ф. Г., Пузакина А.К., Нахатакян Д.Ф. К вопросу продольной модификации зубьев зубчатых колес .....	259
Нахатакян Ф. Г., Пузакина А.К., Нахатакян Д.Ф. Угол перекося в зубчатых передачах и его предельно максимальное значение .....	260
Нахатакян Ф.Г., Пузакина А.К., Нахатакян Д.Ф., Зенкина Я.П. Повышение нагрузочной способности зубчатой передачи с помощью кольцевых канавок.....	262
Пановко М.Я. Задача о точечном упругогидродинамичеком контакте с учётом скачка нагрузки .....	263
Пузакина А.К. Вынужденные колебания цилиндрической оболочки в жидкости при возбуждении дискретными силами .....	264

*Секция №1*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических направлений развития нелинейной волновой механики и технологий.**

**Председатель - Ганиев О.Р., член-корр. РАН, директор НЦ НВМТ,**

**Украинский Л. Е., чл.-корр. РАН зам. директора НЦ НВМТ;**

**Секретарь - Панин С.С., к.т.н., Гранова Г.Н., к.т.н., [ggranova@gmail.com](mailto:ggranova@gmail.com)**

## Волновая технология получения пересыщенного седиментационно-устойчивого солевого раствора повышенной плотности для глушения скважин

*Аверьянов А.П., Султанова И.И., Урманчиев В.И.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;  
sultanov.d.r@yandex.ru

Проведены исследования влияния волновой обработки пересыщенного солевого раствора на степень дисперсности не растворившихся кристаллов соли. Исследования проводили на гидродинамическом стенде НЦ НВМТ РАН. Для волновой обработки использовались экспериментальные волновые генераторы вихревого типа с тангенциальными каналами.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Пересыщенный раствор NaCl подвергался волновой обработке в проточных генераторах в различных режимах, находя оптимальный режим по спектральным характеристикам колебаний в потоке суспензии в генераторе. В результате волновой обработки степень дисперсности существенно возросла: размер частиц соли в пересыщенном растворе при применении обычной механической мешалки от 120 мкм (рисунок 1), а после обработки волновым генератором 1 – 6 мкм.

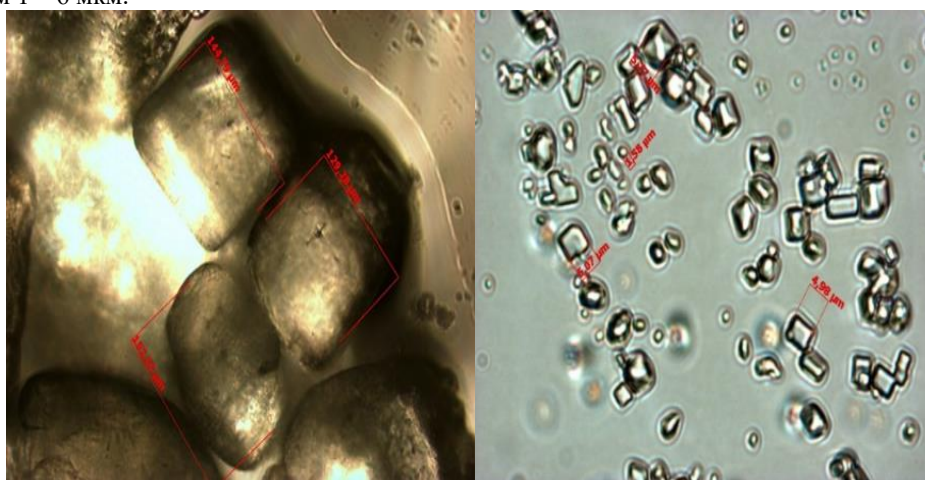


Рис. 1. Микрофотографии суспензии: а – до волновой обработки, б – после волновой обработки.

Повышение дисперсности суспензии привело к повышению седиментационной устойчивости солевого раствора. В свою очередь, это позволяет получить высокостабильный пересыщенный солевой раствор повышенной плотности, достаточной для качественного глушения низкодебитных скважин. Высокая дисперсность суспензии и меньший размер частиц твердой фазы также открывает возможности получения экономически выгодных растворов для глушения высокодебитных скважин путем повышения плотности раствора до требуемых величин с добавлением в него различных утяжелителей.

[1]. Ганиев С.Р., Кузнецов Ю.С., Шмырков О.В. Нелинейные волновые и кавитационные процессы и их влияние на механические свойства вязких растворов. Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 4. С. 410-414.

## Управление волновыми и колебательными процессами в магистральных газопроводах с целью повышения точности измерения расхода и количества газа

Аветисян Г.Р.

<<Отдел гидромеханики и вибротехники НАН РА>> Гюмри, Армения

Измерение расхода и количества газа методом измерения перепада давления применением сужающих устройств – диафрагмы, сопла ИСА 1932, сопла и трубы Вентури, создающие местное сужение потока газа. Вследствие перехода части потенциальной энергии потока в кинетическую, средняя скорость потока в суженном сечении повышается, в результате чего статическое давление в этом сечении становится меньше статического давления газа перед сужающим устройством. Разность этих давлений тем больше, чем больше расход протекающего газа, следовательно, она может служить мерой расхода и количества газа [1].

Целью работы является повышение точности измерения расхода и количества газа.

Уравнение массового расхода для сжимаемых сред имеет вид

$$q_m = C E \varepsilon (\pi d^2 / 4) (2 \rho \Delta P)^{0.5} \quad (1)$$

где  $C$  – коэффициент истечения;

$E$  – коэффициент скорости входа потока в сужающее устройство;

$\varepsilon$  – коэффициент расширения сжимаемых сред (газа);

$d$  – диаметр отверстия или горловины сужающего устройства при рабочей температуре газа;

$\rho$  – плотность газа,

$\Delta P$  – перепад давления на сужающем устройстве.

Поставленная цель достигается применением в узлах измерения расхода и количества газа эффективно функционирующих стабилизаторов пульсаций давления газа перед и после сужающего устройства и на импульсных линиях [2].

На рис. показан общий вид узла измерения расхода и количества газа, который содержит измерительную трубу-1; в трубе установлено сужающее устройство (диафрагма) -2; дифманометр -3; А и Б отсеки измерительной трубы -1 соединяющие с дифманометром -3 импульсные линии -4; уравнивательный вентиль -5; запорные вентили -6; стабилизаторы колебаний давления и расхода газа 7 и 8.

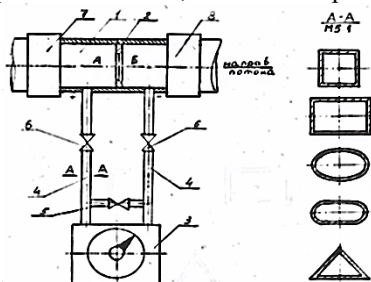


Рис. Общий вид измерительного узла

Предлагаемый измерительный узел функционирует следующим образом. С помощью диафрагмы в отсеках А и Б измерительной трубы создается разность давлений, которые через импульсные линии передается дифманометру. Измеряя разность давлений, уравнением (1) с учетом коэффициентов и параметров состояний газа определяют расход и количество газа. Пульсации давления при прохождении измерительной трубе пульсирующего потока газа и возникшие пульсации давления в отсеках А и Б гасятся стабилизаторами 7 и 8 установленные на начале и конце измерительной трубы и в импульсных линиях, поперечное сечение которых имеют некруглую форму, вид которых показан на рисунке (сечение А-А). В импульсных линиях пульсации давления гасятся за счет деформации некруглых стен.

Работа позволяет значительно сократить необходимый прямой участок измерительной трубы и исключить применения традиционных струевыпрямителей. Оптимальной выбор параметров стабилизаторов, а так же вид поперечных сечений импульсных линий, можно значительно повышать точность измерения расхода и количества газа, надежность и долговечность эксплуатации дифманометров и вторичных приборов.

[1] Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества, Л. <<Машиностроение>> 1989. 701с.

[2] Аветисян Г.Р. Устройство измерения расхода и количества жидкостей и газов. Патент РА № 919, 2001г.

## Управление волновыми и вибрационными процессами в трубопроводных системах применительно к установкам измерения количества отбора воды из водоканалов и водных бассейнов

*Г.Р.Аветисян, А.С.Гаспарян, А.А.Симонян, В.Л.Абгарян*

«Отдел гидромеханики и вибротехники НАН РА» ЗАО, Гюмри, Армения

Расход воды в каналах в основном измеряется произведением

$$Q = V_{cp}F, \quad (1)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость течения воды по каналу,

$F$  – площадь поперечного сечения потока воды, протекающего по каналу.

Цель работы – повышение точности метода «скорость-поверхность» измерения расхода воды в каналах. Средняя скорость измеряется с помощью гидродинамических вертушек в точках  $0,2H$  и  $0,8H$  высоты потока. Площадь поперечного сечения сводится к измерению высоты потока  $H$  в канале, считая ширину канала известным.

Высота  $H$  измеряется устройством конструкция которого показана на рисунке 1, где 1-поперечное сечение канала, 2-сечение колодца, 3-поплавок с рейкой, 4-труба, соединяющая канал с колодцем, 5-установленный

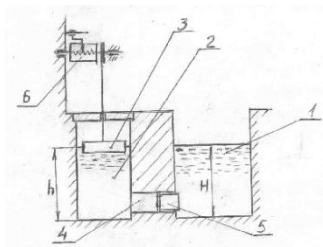


Рис. 1

на трубе 4 со стороны канала стабилизатор пульсаций давления воды в канале, 6-механизм, записывающий движение поплавка 3. [1], [2].

Высота  $H$  потока воды в канале меняется во времени. В зависимости от водопотребления высота  $H$  изменяется как при переходном, так и при установившемся режимах стока.

На рисунке 2 показана кривая для высоты воды  $H$ .

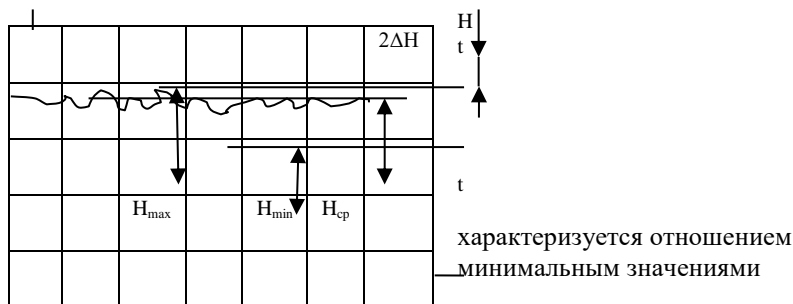


Рис. 2

Степень колебания уровня воды  $H$  разности между максимальным и уровнем к среднему значению:

$$\frac{H_{max} - H_{min}}{H_{cp}} = \frac{2\Delta H}{H_{cp}} = \omega \quad (2)$$

Колебания высоты  $H$  гасятся стабилизатором колебаний давления установленный на трубе соединяющий канал с колодцем поз. 5 на рис.1 [3].

Конструктивные параметры стабилизатора пульсаций давления определяются исходя из волновых уравнений, которые с заданными начальными и граничными условиями решаются методами Фурье [4].

При оптимальном выборе конструктивных параметров стабилизатора можно достичь гашения пульсаций давления на 95%, этим значительно повышается точность отбора воды из водоканалов.

[1] Аветисян Г.Р. Метод измерения расхода воды в каналах. Патент РА № 620У.

[2] Аветисян Г.Р., Гаспарян А.С., Симонян А.А. Система измерения расхода воды в каналах. Патент РА № 621У.

[3] Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность - М.: научно - издательский центр <<Регулярная и хаотическая динамика>>. 2013.

# Смешанные вынужденные и параметрические колебания при нелинейном параметрическом возбуждении

Алифов А.А.

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

a.alifov@yandex.ru

Как известно, для изучения объектов линейные модели представляют собой лишь первое приближение к реальности и справедливы только при незначительных изменениях параметров, описывающих их поведение. Всем реальным явлениям, в сущности, отвечают нелинейные математические модели. Не учет или игнорирование нелинейностью в теории нередко приводит к абсурдным результатам при объяснении реальных явлений.

При работе целого ряда объектов техники могут возникать различные колебательные процессы, в том числе смешанные (взаимодействие типов колебаний). Изучение смешанных колебательных процессов представляет важный научный и практический интерес. Среди задач по изучению смешанных колебаний существенный интерес представляют задачи, связанные с параметрическим возбуждением колебаний. Параметрические колебания наблюдаются, например, в струнах, стержнях, кулачковых механизмах и др. В подавляющем числе исследований, посвященных изучению параметрических колебаний, параметрическое возбуждение принято линейным. Параметрические колебания при нелинейном параметрическом возбуждении рассмотрены в небольшом числе работ, в частности, [1, 2]. Целью работы является изучение смешанных вынужденных и параметрических колебаний при действии нелинейного параметрического возбуждения.

Дифференциальное уравнение, описывающее смешанные вынужденные и параметрические колебания при вынуждающей силе  $\lambda \sin v_1 t$  и нелинейном параметрическом возбуждении  $x^3 \cos vt$ , имеет вид

$$m\ddot{x} + k_0 \dot{x} + c_0 x = \lambda \sin v_1 t - bx^3 \cos vt - f(x), \quad (1)$$

где  $m, k_0, c_0, \lambda, v_1, b, v$  – постоянные величины,  $f(x)$  – нелинейная часть силы упругости.

Решение (1) может быть построено различными методами нелинейной механики [3-4 и др.], которым характерны большие затраты труда и времени. От них отличается метод прямой линеаризации [5 и др.] с несравнимо меньшими (на несколько порядков) затратами труда и времени, которые очень важны в практических расчетах технических объектов. В работе [5] описан метод замены переменных с усреднением и приведены стандартной формы уравнения для решения общего вида нелинейного уравнения с линеаризованными функциями. Они позволяют изучить нестационарные и стационарные процессы. В области основного параметрического резонанса, где разность частот  $\omega_0 - 0.5v$  ( $\omega_0$  – собственная частота) составляет малую величину, используя для (1) отмеченную стандартную форму уравнений, можно получить уравнения нестационарных и стационарных значений амплитуды и фазы колебаний.

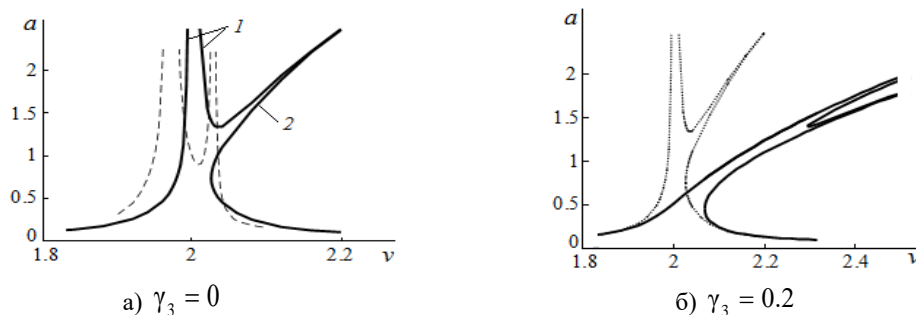


Рис. 1. Амплитудно-частотные кривые

Для получения информации о влиянии нелинейного параметрического возбуждения на амплитуду  $a$  колебаний проведены расчеты с использованием ряда параметров. Нелинейная составляющая силы упругости принята в виде  $\gamma_3 x^3$ ,  $\gamma_3 = const$ . На рис.1 показаны некоторые результаты расчетов в случае линейной (рис.1,а) и нелинейной жесткой (рис.1,б) характеристик силы упругости. Штриховые тонкие кривые на рис.1,а представляют случай линейного параметрического возбуждения, т.е.  $x \cos vt$ , и приведены для сравнения с кривыми 1 и 2 нелинейного

возбуждения, а пунктирные линии на рис.1,б соответствуют  $\gamma_3 = 0$  при нелинейном параметрическом возбуждении.

Заметим, что такие же результаты получаются, если для решения уравнения (1) использовать метод усреднения [4].

[1]. Шмидт Г. Параметрические колебания. М.: Мир, 1978. 336 с.

[2]. Алифов А.А. Колебания при нелинейном параметрическом и ограниченном возбуждении // Динамика систем, механизмов и машин, 2022. Том 10, №1, с.2-6. DOI: 10.25206/2310-9793-2022-10-1-2-6.

[3]. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1979. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И.Блехмана. 1979. 351 с.

[4]. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974. 504 с.

[5]. Алифов А.А. Методы прямой линеаризации для расчета нелинейных систем. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2015. 74 с.

## **Разработка волновой технологии интенсификации приготовления буровых суспензий на углеводородной основе.**

*Артамонов В.Ю., Крюков А.И., Султанова И.И.*

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

Для достижения эффективного решения задач по исследованию применения волновых эффектов для интенсификации приготовления буровых растворов на углеводородной основе (РУО), а также имея ввиду высокую абразивность некоторых компонентов, было решено разбить последующие экспериментальные исследования на три этапа.

На первом этапе необходимо определить возможность приготовления коллоидно-стабильной, устойчивой эмульсионной основы РУО с применением волнового воздействия. Эмульсионной основой РУО является базовое масло, эмульгатор и водная фаза с соотношением фаз согласно рецептуре РУО. Данная эмульсионная основа РУО является подходящей модельной жидкостью для изучения влияния волнового воздействия. Далее необходимо определить оптимальные режимы процесса приготовления эмульсионной основы РУО с помощью волнового генератора. В случае необходимости, произвести корректировку конструкции генератора. По результатам проведенных экспериментов, оценить возможность применения волновых генераторов с целью интенсификации процессов приготовления бурового раствора на углеводородной основе

На втором этапе проведения экспериментальных исследований необходимо определить возможность приготовления коллоидно-стабильной, устойчивой эмульсионной основы РУО с различными соотношениями фаз В/М (водная и масляная) от 30/70 до 70/30 с шагом 5%. В процессе проведения исследований, в случае необходимости, произвести корректировку оптимальных режимов процесса приготовления эмульсионной основы РУО с помощью волнового генератора. По результатам экспериментов необходимо оценить возможность снижения применяемой доли углеводородной части в составе РУО путем введения дополнительной водной фазы в эмульсионную основу раствора при его приготовлении с применением волнового генератора.

На третьем этапе проведения экспериментальных исследований необходимо подтвердить полученные на первом и втором этапах результаты на полноценном буровом растворе на углеводородной основе заданной рецептуры. Необходимо определить возможность получения заданных рецептурой и Регламентом по применению буровых растворов на углеводородной основе характеристик РУО, в том числе при утяжелении до необходимой плотности заданным материалом-утяжелителем (карбонат кальция). Далее необходимо произвести контроль его технологических свойств (параметров) с учетом требований ГОСТ 33697-2015 (ISO 10414-2:2011).

Вышеописанная методика разработана для проведения экспериментальных исследований для разработки волновой технологии интенсификации приготовления буровых суспензий на углеводородной основе.

[1]. Кузнецов Ю.С., Аверьянов А.П., Бастриков С.Н., Овчинников П.В., Султанов Д.Р., Урманчеев В.И. Прорывные технологии в процессах диспергирования буровых технологических жидкостей для бурения и освоения нефтяных и газовых скважин. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2022. № 4 (154). С. 93-102.

[2]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Гранова Г.Н., Аверьянов А.П., Айдагулов Р.Р., Артамонов В.Ю., Брызгалов Е.А., Бутикова О.А., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р., Гришняев И.Н., Жебынев Д.А., Звягин А.В., Ильгамов М.А., Кислогубова О.Н., Кормилицын В.И., Корнеев А.С., Касилов В.П., Косьянчук В.В., Котельников В.А. и др. Фундаментальные основы волновых технологий обработки многокомпонентных жидких и вязких составов. Отчет о НИР. 2020.

## Интенсификация обработки глинистых суспензий

Артамонов В.Ю., Султанов Д.Р., Шульгина А.П.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;  
sultanov.d.r@yandex.ru

В работе приведены результаты исследований влияния волновых технологий на физико-механические свойства бурового раствора в лабораторных условиях НЦ НВМТ РАН и промышленных условиях ПАО «Татнефть». Показано, что в результате волновой обработки в течение 25 мин проточными гидродинамическими генераторами плоского типа с цилиндрическими телами обтекания статическое напряжение сдвига и количество мелких частиц размером 1-4 мкм плавно возрастает. Статическое напряжение сдвига (10 сек) достигает величин 1,8 Па, а количество мелких частиц размером 1-4 мкм достигает 40% от объема обрабатываемой среды. Количество крупных частиц размером 10-20 мкм и более за время обработки  $t = 3-6$  мин снижается почти в 3 раза. Графики распределения частиц бурового раствора по размерам без волновой обработки и после обработки приведены на Рисунке 1. Это означает, что волновая обработка бурового раствора приводит к повышению качества раствора, за счет повышения коллоидной фракции, и тем самым к снижению расхода глинопорошка, а также к уменьшению в несколько раз времени приготовления бурового раствора по сравнению с традиционной технологией.

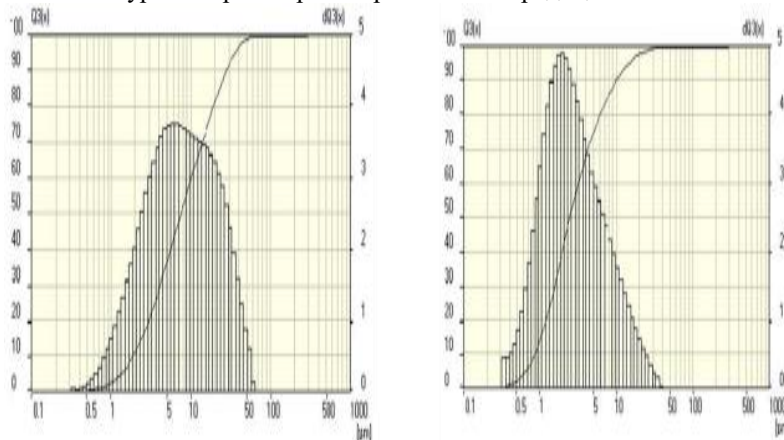


Рис. 1 - Распределение частиц бурового раствора по размерам без волновой обработки и после обработки.

[1]. Кузнецов Ю.С., Аверьянов А.П., Бастриков С.Н., Овчинников П.В., Султанов Д.Р., Урманчеев В.И. Прорывные технологии в процессах диспергирования буровых технологических жидкостей для бурения и освоения нефтяных и газовых скважин. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2022. № 4 (154). С. 93-102.

[2]. Ганиев Р.Ф., Шафигуллин Р.И., Украинский Л.Е., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р., Кузнецов Ю.С., Султанов Д.Р., Шамов Н.А. Способ волновой обработки стволов нефтяных и газовых скважин и волновые генераторы для его осуществления. Патент на изобретение 2746572 С1, 15.04.2021. Заявка № 2020134866 от 23.10.2020.



## Волновые гидромассажеры

<sup>1</sup>Велиев Е. И., <sup>2</sup>Ганиев Р. Ф., <sup>2\*</sup>Корнеев А. С., <sup>2</sup>Украинский Л. Е.

<sup>1</sup>Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Городская клиническая больница имени С.П. Боткина Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Научный Центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, Москва, Россия

\*E-mail: korneev47@gmail.com

В НИЦ НВМТ РАН разработаны гидроволновые массажеры [1,2], которые обеспечивают циклическое вакуум-прессующее воздействие на кожный покров человека. Это принципиально отличает их от традиционных гидромассажных устройств, в которых отсутствует фаза создания вакуума (“присасывающего”, или отрицательного давления). Таким образом, волновые массажеры позволяют сочетать обычную гидротерапию с вакуум-терапией, что может дать полезный физиотерапевтический эффект. В волновых массажерах используется либо чистая вода, либо вода с лекарственными добавками.

Основные типы разработанных гидромассажеров представлены на рис.1.

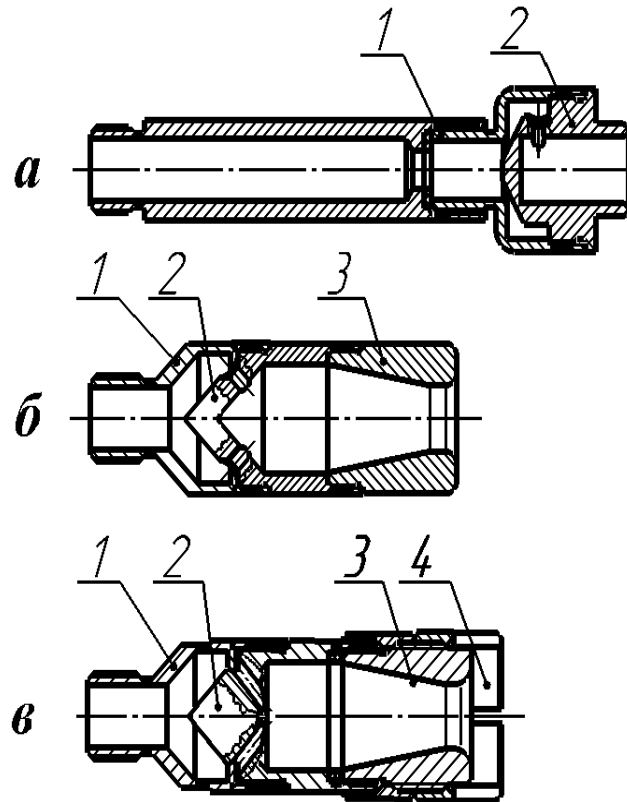


Рис.1. Конструктивные схемы разработанных гидромассажеров: а) с тангенциальной подачей, б) с тангенциально-аксиальной подачей, в) с дефлектором:

1–корпус, 2–завихритель, 3–сопло, 4–дефлектор

В завихрителе 2 массажера первого типа (рис.1,а) выполнены тангенциальные отверстия, обеспечивающие закрутку потока. За счет центробежных эффектов в приосевой области происходит понижение давления до величины примерно на 0,01 МПа ниже атмосферного давления. При течении закрученной струи в канале массажера возникают нестационарные потоки жидкости, приводящие к генерации колебаний давления и к возникновению волн, оказывающих массажный эффект.

В завихрителях 2 массажеров второго и третьего типа подающие отверстия, показанные на рис. 1,б и 1,в условно, выполнены таким образом, что они обеспечивают комбинированную аксиально-тангенциальную подачу рабочей жидкости, что обеспечивает повышение амплитуды колебаний давления. Массажеры первого и второго типа (рис.1,а и рис.1,б) для своей работы должны быть погружены в воду, что создает неудобство в использовании. В последнем типе (рис. 1,в) имеется прорезной дефлектор 4, внутри которого образуется полость, заполненная водой, через которую хорошо передаются волны давления и разрежения. Тем самым обеспечивается нормальная работа гидромассажера при истечении рабочей жидкости как в воду, так и в воздух. Это позволяет пользоваться массажером не только в ванне, но и в душе, а при массаировании рук – над раковиной

Экспериментальные спектральные характеристики колебаний для массажера с дефлектором представлены на рис.2. Данные приведены при абсолютном давлении на входе в массажер  $p = 0,56$  МПа и расходе воды  $Q = 12$  дм<sup>3</sup>/мин в точке, расположенной на расстоянии  $h = 2$  мм от выхода из дефлектора, на оси симметрии.

Можно отметить, что при переходе от истечения в воду к истечению в воздух максимальные амплитуды колебаний изменились незначительно. При этом появились дополнительные максимумы в области частоты 180 Гц.

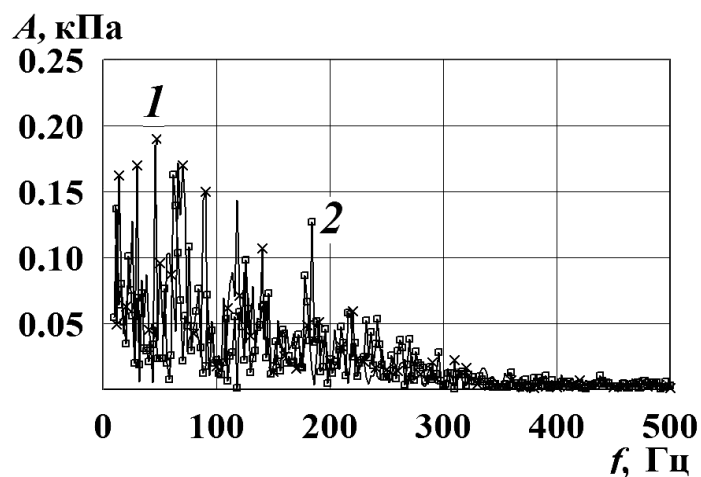


Рис.2. Амплитудно-частотные характеристики колебаний для массажера с дефлектором:  
1–истечение в воду, 2–истечение в воздух

[1]. Ганиев Р. Ф., Корнеев А. С. Волновые гидромассажеры // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2014. №4. С. 99 – 101.

[2]. Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Корнеев А. С, и др. Волновое устройство для гидромассажа. Патент РФ на полезную модель №210193, выдан 31.03.2022, опубл. 31.03.2022, бюл. №10.

## Волновые процессы в технологии спуска и цементирования обсадной колонны

Ганиев О.Р., Шамов Н.А., Султанов Д.Р., Султанова И.И.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

E-mail: shamov.na@mail.ru

Цель использования предлагаемой технологии

Предотвращение межпластовых перетоков, поглощений растворов, сероводородной агрессии, повышение качества цементирования и обратного прорыва тампонажного раствора из затрубья в обсадную колонну.

Средства достижения поставленной цели

Задача может решаться путем проведения кольматации твердой фазой буровых растворов, поглощающих [1, 2] и проявляющих пропластков ствола скважины при спуске обсадной колонны, а также в процессе последующей активации тампонажного раствора на забое скважины при цементировании [3],

а также предотвращения обратного течения тампонажного раствора из затрубья в обсадную колонну за счет применения обратного клапана манжетного типа [4], разработанного НЦ НВМТ ИМАШ РАН.

Описание конструкции низа обсадной колонны

Схема конструкции [2] приведена на рис. 1.

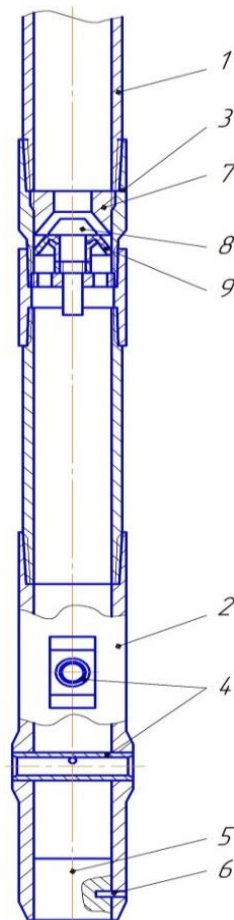


Рис. 1. Компоновка низа обсадной колонны

Низ колонны 1 включает волновой башмак 2 и цементировочный клапан 3. В башмаке размещены кавитационно-вихревые генераторы 4, заглушка 5, удерживаемая срезным штифтом 6. Клапан содержит седло 7, сердечник 8 и эластичную манжету 9, которые образуют конический запорный узел с большой площадью поверхности уплотнения и выдерживающий перепад давления 25–30 МПа. Герметичность узла не нарушается даже при попадании в зону уплотнения крупных кусочков горной породы, цемента и металла.

Конструкция клапана простая, надежная и состоит из 6–7 деталей. Наиболее широко применяемые в промышленности шаровые клапаны (типа ЦКОД) состоят из 18–19 деталей, имеют гораздо более высокую трудоемкость изготовления при низкой надежности функционирования. Поэтому в практике спуска и цементирования осадных колонн зачастую вынужденно устанавливают в компоновку второй шаровой клапан.

Технология применения предложенной техники

В процессе спуска колонны предлагается использовать попутную кольматацию склонных к проявлениям пластовых сред (например, сероводорода) и поглощениям буровых и тампонажных растворов пропластков, что позволит создать более прочную и герметичную крепь колонны. Процесс волновой кольматации осуществляется при частоте вращения колонны спускаемых труб 1.25 с-1 со скоростью спуска 0.2–0.4 м/с.

После спуска производится кавитационно-вихревое диспергирование тампонажного раствора путем продавливания через генераторы волнового башмака, который сопровождается измельчением и гидратированием твердой фазы, и как следствие, повышением седиментационной устойчивости раствора, повышением прочности и однородности цементного камня.

Генераторы могут быть изготовлены из легко разбуриваемого шарошечными долотами материалов, например серого чугуна, или хрупкого, но износостойкого силицированного графита.

При случайном забивании волновых генераторов шламом, крупными кусками породы произойдет повышение давления внутри обсадной колонны выше допустимого. При этом заглушка 5 срежет штифт 6 и выпадет на забой скважины. В этом случае процесс заканчивания крепления колонны завершается по ране применяемой технологии.

После схватывания тампонажного раствора производится разбуривание в обсадной колонне цементной пробки, внутренних деталей цементировочного клапана, кавитационно-вихревых генераторов и при необходимости заглушки башмака.

Методика предварительного расчета размеров и параметров вихревых генераторов

Длина генератора и диаметральный размер башмака по его ребрам должны быть меньше диаметра ствола на размер  $b_i$ , который определяется из следующего выражения,

$$b_i \approx \sqrt{S_{ik}}$$

где  $S_{ik}$  – общая площадь проходных сечений тангенциальных каналов одного генератора.

Диаметр вихревой камеры генератора

$$d_{vk} \approx (2.8...3.2)\sqrt{S_{ik}}.$$

Расход раствора через один генератор

$$Q_g = \mu_g S_{ik} \sqrt{\frac{2\Delta P_g}{\rho_r}},$$

где  $\mu_g$  – коэффициент истечения жидкости из тангенциального канала в вихревую камеру (для бурового раствора 0.78–0.80, тампонажного раствора 0.72–0.74);

$\Delta P_g$  – заданный перепад давления жидкости на входе и выходе из генераторов (3.8–4.3 МПа);

$\rho_r$  – плотность активируемого раствора.

Процесс волновой кольматации сложного участка

ствола, осуществляется, например, при частоте вращения колонны спускаемых труб 1.25 с-1 со скоростью спуска должна быть не более 0.2 м/с.

Заключение

Приведенные формулы и численные данные для выполнения расчетов генераторов будут уточняться в процессе проведения лабораторно-стендовых и промысловых экспериментов.

[1]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. – Изд. 2-е, дополн. – М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. – 780 с.

[2]. Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении. М.: R&C Dynamics. 2010. 5.16 п.л.

[3]. Шапов Н.А. Интенсификация процессов строительства и ремонта нефтедобывающих и нагнетательных скважин на основе теории нелинейной волновой механики многофазных сред. Дис. док. техн. наук: 25.00.15: защищена 2013. – М., 2014. – С.126.

[4]. Ганиев О.Р., Устенко И.Г., Шапов Н.А. [и др.]. Обратный клапан. Патент 178337 RU, кл. E21B 34/10, опубл. 30.03.2018; Бюл. № 10. – 4 с.: ил.

# Высокооборотное ударное бурение скважин при одновременном создании волн давления на забое

Ганиев Р.Ф., Ганиев О.Р., Шамов Н.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

E-mail: shamov.na@mail.ru

## Цель работы

Повысить производительность бурения, снизить износ оборудования и инструмента предотвратить пластовые проявления, поглощения буровых растворов и иные осложнения путем применения техники и технологии высокоскоростного бурения, созданных на базе нелинейной волновой механики [1].

## Особенности конструкции предлагаемого оборудования

В конструкции надтурбинного генератора 1 волн давления (рис. 1) применена торцевая схема размещения ротора и статора, которая представляет радиально-осевую твердосплавную пару скольжения, в излучающих отверстиях которой установлены твердосплавные втулки [2]. Вследствие этого заметно повышается коэффициент полезного действия  $\eta$  генератора.

Роторный узел генератора вращается от “плавающего” профильного вала верхней секции 2 турбобура [2]. В секциях 2 и 3 турбины ротора и статора разделены на пять и более пакетов, опирающихся на твердосплавные радиально-упорные подшипники скольжения, что позволяет существенно снизить биение и стабилизировать работу роторов турбобура на высоких оборотах от 15 до 20 с<sup>-1</sup> [3].

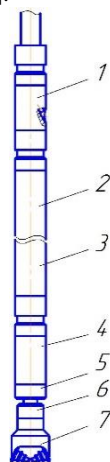


Рис. 1. Принципиальная схема устройства

Конструкция шпindelной секции 4 турбобура [4] обеспечивает за счет применения радиальных твердосплавных опор и защищенных герметичной смазочной камерой шаровых упорных подшипников от попадания промывочной среды существенное снижение радиальных и осевых биений вала 5 при высокооборотном бурении. Размещение нижнего радиального подшипника скольжения в ниппельной гайке 6 позволяет максимально приблизить долото 7 к данному подшипнику и снизить его радиальные биения при высоких оборотах.

## Расчетные характеристики генератора волн

Диаметр излучающих отверстий в торцевых роторе и статоре генератора равен

$$d_0 = \frac{\pi d_r z}{\xi_g m_r m_s},$$

где  $d_r$  – диаметр окружности, на которой размещены центры отверстий ротора и статора;  $z$  – число одновременно открывающихся отверстий;  $\xi_g$  – коэффициент периодичности создаваемого волнового процесса (при  $\xi_g = 4$  – равнопериодический процесс);  $m_r$  – количество равномерно размещенных по окружности отверстий в роторе;  $m_s$  – количество отверстий в статоре, также равномерно размещенных по окружности.

Амплитуда давления на стенке скважины у выхода из излучающего канала генератора

$$P_0 = \sqrt{\frac{8\rho_{br}c_{br}\Delta P_g Q_{br}\eta}{\pi z d_0^2}},$$

где  $\rho_{br}$  и  $c_{br}$  – плотность бурового раствора и скорость звука в нем;  $\Delta P_g$  – перепад давления жидкости на генераторе;  $Q_{br}$  – расход бурового раствора через генератор.

Частота колебаний давления

$$f_v = \frac{n_v m_r m_s}{z},$$

где  $n_v$  – частота вращения вала турбобура.

## Механизм высокооборотного шарошечного бурения

В момент упругого удара об забой 1  $i$ -того зубка 2 долота в породе возникает волна давления 3 и образуется сеть трещин 4 (рис. 2).

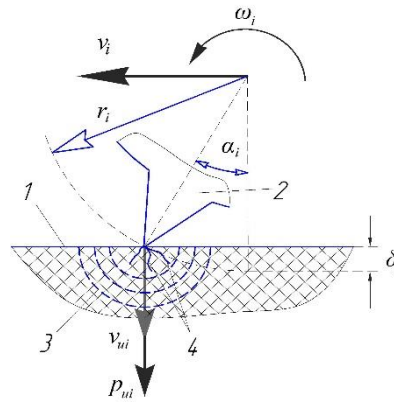


Рис. 2. Момент упругого удара зубка о забой

Начальная амплитуда давления [5] в волне составит

$$P_{ui} = \rho_n c_n v_{ui},$$

где  $\rho_n$  – плотность горной породы;  $c_n$  – скорость звука в ней;  $v_{ui}$  – скорость  $i$ -того зубка в момент удара о забой.

$$v_{ui} = \omega_i r_i \sin \alpha_i = \frac{\pi n_d}{30} r_i \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_i} = \frac{\pi n_d}{30} i_s \sqrt{\delta_i (2r_i - \delta_i)},$$

где  $\omega_i$  – угловая частота вращения шарошки;  $r_i$  – радиус по вершине зубка относительно оси шарошки;  $n_d$  – число оборотов долота в минуту;  $\delta_i$  – глубина внедрения  $i$ -того зубка в породу;  $i_s$  – передаточное отношение шарошки.

Процесс разрушения при дальнейшем внедрении в породу зубка 1 представлен на рис. 3. При этом происходит отрыв фрагментов 3 горной породы, образование лунки 4 и новой сети трещин 5, в том числе за счет сил распора и сдвига. Амплитуда давления удара зубка о породу будет равна

$$P_{ui} = \frac{\pi n_d}{30} \rho_n c_n i_s \sqrt{\delta_i (2r_i - \delta_i)}.$$

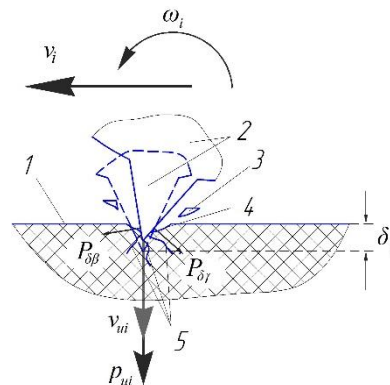


Рис. 3. Образование лунки разрушения

На величину амплитуды звукового давления в волне на стенке скважины накладывается следующее ограничение

$$P_{ef} = \frac{P_0}{\sqrt{2}} \triangleleft \sigma_p,$$

где  $P_{ef}$  – эффективное значение звукового давления в волне;  $\sigma_p$  – предел прочности горной породы на растяжение.

### Результаты промысловых экспериментов

Применение первого образца надтурбинного роторно-пульсационного генератора было осуществлено на скважине № 2241 Восточно-Сергинской площади в Якутии. В бурильной компоновке применялись турбобур ЗТСШ-240, шарошечные долота ЗТВШ-269.9. При использовании генератора средняя проходка на долото в 1.7–4.9 раза выше, средняя механическая скорость в 1.9–5.0 раза больше.

Применение радиальной схемы размещения ротора в статоре приводило к заклиниванию, увеличению их износа и потерь расхода бурового раствора. Использование же торцевой схемы конструкции ротора и статора в роторно-пульсационном генераторе при очистке пристволенной зон продуктивных пластов скважин показали высокую надежность и эффективность функционирования генератора.

При фрезеровании сужения стенки обсадной колонны райбером ФКК-124 с диаметра 122 мм до 124 мм винтовым двигателем Д-85 при оборотах 160–180 об/мин и турбобуром 2ТСП-105 при оборотах 700–750 об/мин скорость резания последним была в 10 раз выше.

В процессе бурения “взрыв”-пакеров из алюминиевых сплавов шарошечными долотами 124С-ЦА винтовым двигателем Д-105 при оборотах 160–180 об/мин и турбобуром 2ТСР-105 при оборотах 700–750 об/мин скорость резания последним была в 5–13 раз выше.

В процессе бурения обычных цементных мостов в скважинах шарошечными долотами 124С-ЦА винтовым двигателем Д-105 при оборотах 160–180 об/мин и турбобуром 2ТСР-105 при оборотах 660–700 об/мин скорость бурения последним была в 4–4.5 раз выше.

При бурении цементных мостов с пропантом и гранитной крошкой шарошечными долотами 124С-ЦА винтовым двигателем Д-105 при оборотах 160–180 об/мин и турбобуром 2ТСР-105 при оборотах 660–680 об/мин скорость бурения последним была в 8–8.2 раз выше.

#### **Выводы**

Применение высокооборотного бурения, особенно с использованием волновых явлений, предоставляет новые возможности улучшения баланса затрат энергии в сторону увеличения производительности бурения и улучшения качества вскрытия продуктивных пластов.

Менее дорогие, но более простые, незаполненные маслом шарошечные долота, работали намного лучше на высоких оборотах, чем заполненные маслом с герметичными опорами долота.

Использование шарошечных долот в компоновке с высокооборотным турбобуром показало не только высокую скорость бурения, но и более продолжительную их работоспособность по сравнению с бурением винтовыми двигателями, в том числе вследствие более низкой нагрузки на забой.

[1]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, дополн. М.: Институт компьютерных исследований. Научно-издат. центр “Регулярная и хаотическая динамика”. 2011. 780 с.

[2]. Ганиев О.Р., Шапов Н.А., Устенко И.Г. и др. Турбобур. Патент 2655130 RU, кл. E21 В 4/02. Заявл. 24.07.2017. Оpub. 2018, бюл. № 15. 7 с.

[3]. Шапов Н.А. Турбинная секция турбобура. Патент 2231607 RU, кл. E21 В 4/02. Заявл. 23.10.2002. Оpub. 2004, бюл. № 18. 5 с.

[4]. Шапов Н.А. Шпиндель забойного двигателя. Патент 2231606 RU, кл. E21 В 4/02. Заявл. 23.10.02. Оpub. 2004, бюл. № 18. 1993. 10 с.

[5]. Шапов Н.А., Артамонов В.Ю. К механизмам разрушения породы при высокооборотном шарошечном бурении и волновых явлениях на забое // Электрон. научн. ж-л “Нефтегазовое дело”. 2013. № 3. С. 34–45

## **О возможности применения пароводяного генератора колебаний для повышения эффективности добычи сверхвязкой нефти**

**Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Гришняев И.Н., Чукаев А.Г.,  
Фельдман А. М., Жебынев Д. А.**

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

*E-mail: Zda@nwmic.ac.ru*

В настоящее время осваиваются месторождения с залежами сверхвязкой нефти. Однако добыча такой нефти сопряжена со значительными трудностями, поскольку существующие методы добычи маловязкой нефти здесь не пригодны. В связи с этим возникает необходимость создания и разработки новых эффективных методов добычи вязкой нефти. Одним из перспективных методов добычи является метод с использованием пара. В этом методе пар подводится к нефтяному пласту, нагревает нефть, снижает ее вязкость и обычным способом она подается наверх. Однако, этот метод добычи требует очень высоких энергетических затрат, из-за которых себестоимость нефти существенно возрастает. По этой причине возникает необходимость в снижении энергетических затрат. С этой целью используют различные методы повышения интенсификации добычи сверхвязкой нефти, среди которых одним из наиболее перспективных является метод использования пара или нагретой воды с применением волновой технологии.

Волновая технология [1], как правило, для интенсификации различных технологических процессов использует колебательные воздействия давлением большой амплитуды на различные среды, благодаря которым изменяются их физико-химические свойства или скорость их изменения. Поскольку для добычи вязкой нефти используется пар, то естественно возникает вопрос о создании генератора, работающего на паре или в совокупности с водой, то есть пароводяного генератора колебаний. В данной работе рассмотрен вопрос о создании пароводяного генератора колебаний давления в потоке горячей воды на базе пароводяного струйного инжектора [2].

Пароводяные струйные инжекторы используются главным образом для подачи воды в паровые котлы и в нагревательных устройствах для повышения эффективности теплопередачи. Управляя процессами взаимодействия потока водяного пара и воды, можно использовать инжектор для разных целей. Нами он использован для нагрева потока воды и генерирования в нем колебаний давления высокой амплитуды. Основными узлами инжектора являются сопло и камера смешения. В работе рассматривался вариант инжектора, в котором на вход сопла подается под давлением пар, а в зазор между выходом сопла и входом камеры смешения - вода.

Расчетно-экспериментальным путем были найдены комбинации размеров сопла и камеры смешения, в которых возможны возбуждения пульсаций давления. В качестве рабочих сопел использовали сверхзвуковые сопла Лаваля, рассчитанные под рабочие параметры используемого пара. Для каждого сопла рассчитывалась камера смешения с соответствующим диаметром цилиндрического напорного сопла (горловины диффузора).

Для исследования пароводяных инжекторов был разработан специальный стенд, в котором в качестве источника пара использовался парогенератор электрический электродный марки ПЭЭ – 100 с максимальными давлением и производительностью пара 10 бар и 100 кг/ч соответственно. Стенд оборудован узлами измерения давления, расхода воды, температуры, а также переменного давления.

Экспериментальным путем было установлено, что стабильные по частоте релаксационные колебания давления возбуждаются в потоке нагретой воды при создании в камере смешения противодействия близкого к давлению подаваемой воды. Кроме того, были найдены оптимальные коэффициенты инжекции воды, при которых она нагревалась до 75 - 95°C и обеспечивалась высокая стабильность колебаний.

В испытаниях разработанных инжекторов при давлении рабочего пара 8 – 10 бар был получен размах колебаний давления в нагретом потоке воды 5 – 7 бар на частотах 5 – 20 Гц.

Таким образом, представляется возможным, используя пароводяной инжектор в режиме возбуждения нелинейных колебаний, создавать нагретый поток воды с пульсациями давления, которым можно обрабатывать нефтяной пласт, повышая тем самым эффективность его тепловой обработки. Согласно литературным данным [3] такая тепловая обработка пласта сверхвязкой нефти является наиболее эффективной.

[1]. Ганиев Р. Ф. Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию). М.: Науч.-издат.центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 192 с.

[2]. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.

[3]. Прошечальников Д.В., Кульментьева Е.И., Рамазанов Р.Р., Солодов С.Д., Гурьянов А.И. Оценка эффективности гидрои импульсного воздействия на призабойную зону скважины. Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №22, с. 131 – 133.



## **Волновые технологии в процессах строительства нефтяных и газовых скважин.**

*Ганиев С.Р.*

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

Проблемы совершенствования и дальнейшего развития технологий строительства скважин, решение которых приводит к росту качества и технико-экономических показателей, во многом зависят от эффективности применяемых технологий. На основании проведенного обзора различных технологий сделан вывод: в сложившихся обстоятельствах становится очевидным, что разработка научных основ волновой технологии повышения качества строительства скважин, увеличения нефте- и газоконденсата отдачи пластов и дальнейшее их развитие в направлении повышения качества и технико-экономической эффективности приобретают как актуальность, так и научно-прикладную значимость.

На основании углубленного анализа основ волновой механики многофазных сред, созданной научной школой под руководством академика РАН Ганиева Р.Ф. разработана научно обоснованная модель воздействия гидродинамическими полями высокой энергии, создаваемыми генераторами проточного типа с телами обтекания на различные дисперсные системы, послужившая теоретической основой создания волновой технологии приготовления и обработки буровых промывочных жидкостей с улучшенными технологическими характеристиками при существенной экономии исходных компонентов и химически активных реагентов в расчете на объемную единицу получаемой продукции.

Разработаны модели волновых генераторов, создающих волновое поле при истечении буровой жидкости из промывочных отверстий пород разрушающего инструмента (долота), позволившая осуществить гидродинамическую очистку ствола скважины от выбуренной породы с одновременной кольматацией пристволенной части проницаемой породы с целью обеспечения его устойчивости и избегания осложнений при бурении.

Разработанные нами перспективные волновые технологии бурения и крепления скважин, прошли широкую апробацию в ПАО «Тат-нефть».

[1]. Кузнецов Ю.С., Аверьянов А.П., Бастриков С.Н., Овчинников П.В., Султанов Д.Р., Урманчеев В.И. Прорывные технологии в процессах диспергирования буровых технологических жидкостей для бурения и освоения нефтяных и газовых скважин. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2022. № 4 (154). С. 93-102.

[2]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Гранова Г.Н., Аверьянов А.П., Айдагулов Р.Р., Артамонов В.Ю., Брызгалов Е.А., Бутикова О.А., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р., Гришняев И.Н., Жебынев Д.А., Звягин А.В., Ильгамов М.А., Кислогубова О.Н., Кормилицын В.И., Корнеев А.С., Касилов В.П., Косьянчук В.В., Котельников В.А. и др. Фундаментальные основы волновых технологий обработки многокомпонентных жидких и вязких составов. Отчет о НИР. 2020.

# Применение волновых резонансных воздействий для интенсификации гидролиза крахмала под действием $\beta$ -амилазы

<sup>1</sup>Ганиев С.Р., <sup>1</sup>Касилов В.П., <sup>1</sup>Кислогубова О.Н., <sup>1</sup>Бутикова О.А., <sup>1,2</sup>Кочкина Н.Е.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благодирова РАН, Москва, Россия;

<sup>2</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия  
(oskobeleva83@gmail.com)

## Цель работы

Изучение влияния волновых резонансных воздействий на процесс гидролиза кукурузного и картофельного крахмалов под действием фермента  $\beta$ -амилазы.

## Материалы и методы

В работе использовали картофельный (ГОСТ Р53876-2010) и кукурузный (ГОСТ 32159-2013) крахмалы, зерновую  $\beta$ -амилазу (Optimal BVA, Genencor, USA).

Суспензию крахмала (15 масс. %) смешивали с предварительно нагретым до 40°C разбавленным раствором  $\beta$ -амилазы и обрабатывали в волновом аппарате оригинальной конструкции (разработка НЦ НВМТ РАН). В рабочей камере аппарата при помощи резонансного электромеханического привода формируются необходимые режимы волнового воздействия. Обработку выполняли в течение 120 минут без дополнительного подогрева системы. Отбирали пробы суспензии через заданные промежутки времени и определяли в них содержание растворимых сахаров по реакции с 3,5-динитросалициловой кислотой [1]. Морфологию гранул крахмала изучали методом СЭМ.

Для сравнения выполняли ферментативный гидролиз крахмала на лабораторном встряхивателе MLW THYS при температуре 40°C.

## Результаты и их обсуждение

На Рис.1 представлены зависимости концентрации сахаров в водных дисперсиях образцов кукурузного и картофельного крахмала от времени их ферментативного гидролиза с использованием различных способов перемешивания.

В случае гидролиза кукурузного крахмала волновые резонансные воздействия оказывают интенсифицирующее влияние уже в течение первых 10 мин. Увеличение продолжительности ферментативной обработки до 120 мин. сопровождается дальнейшим накоплением растворимых сахаров в системах. В итоге, количество сахаристых веществ в дисперсии этого крахмала, обрабатываемой при наложении волновых резонансных воздействий, составляет 2.55 мг/мл, а при традиционном способе перемешивания 0.72 мг/мл. Картофельный крахмал гораздо менее подвержен ферментативному гидролизу, чем кукурузный. Тем не менее, применение волновых резонансных воздействий способствует ускорению процесса осахаривания данного вида крахмала спустя 40 минут после его начала.

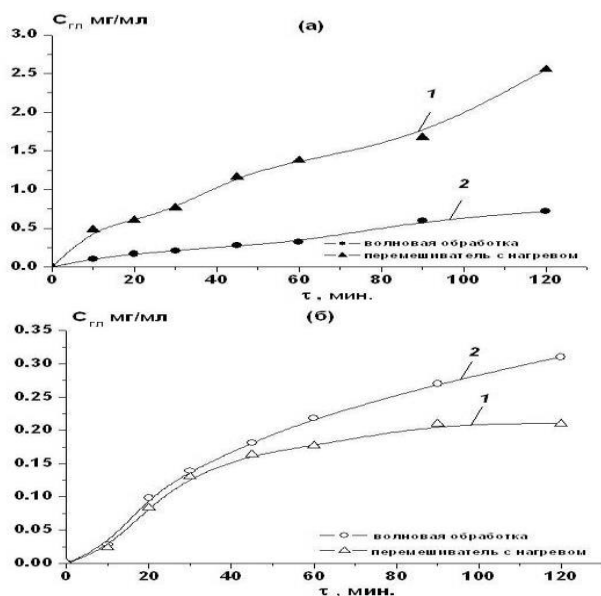


Рис. 1. Временные зависимости концентрации сахаров, образуемых при гидролизе кукурузного (а) и картофельного (б) крахмалов  $\beta$ -амилазой. Метод перемешивания: традиционная мешалка - кривая 1; волновые резонансные воздействия - кривая 2.

Продуктами реакции гидролиза данного биополимера  $\beta$ -амилазой являются сахара и пористый крахмал. Последний имеет большую практическую ценность, т.к. может применяться в качестве природного адсорбента, носителя красителей, ароматизаторов, лекарственных препаратов и т.п.

Результаты изучения методом СЭМ гидролизованых в настоящей работе образцов подтверждают образование пор на поверхности гранул крахмала. Размер и количество пор не зависит от типа используемого

механического воздействия, а определяется, по-видимому, специфичностью действия, которую проявляет  $\beta$ -амилаза по отношению к биополимеру.

Таким образом, выполненное исследование демонстрирует возможность интенсификации процесса ферментативного гидролиза крахмала с помощью волновых резонансных воздействий. Это, в перспективе, позволит сократить продолжительность данной технологической операции и усовершенствовать соответствующие способы получения образуемых продуктов.

[1]. ГОСТ 31662-2012. Препараты ферментные. Методы определения ферментативной активности целлюлазы. От 20.06.2012.

## Волновая технология приготовления тампонажных растворов для цементирования скважин

Ганиев С.Р., Кузнецов Ю.С., Пустовгар А.П., Султанов Д.Р.

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

В результате проведенных исследований была разработана волновая технология приготовления тампонажных растворов для цементирования скважин. Технология широко апробирована при цементировании кондукторов, обсадных колонн и хвостовиков.

Доказано, что после обработки тампонажного раствора (при прокачивании его через волновой генератор), существенно улучшаются его основные технологические характеристики (Рисунок).

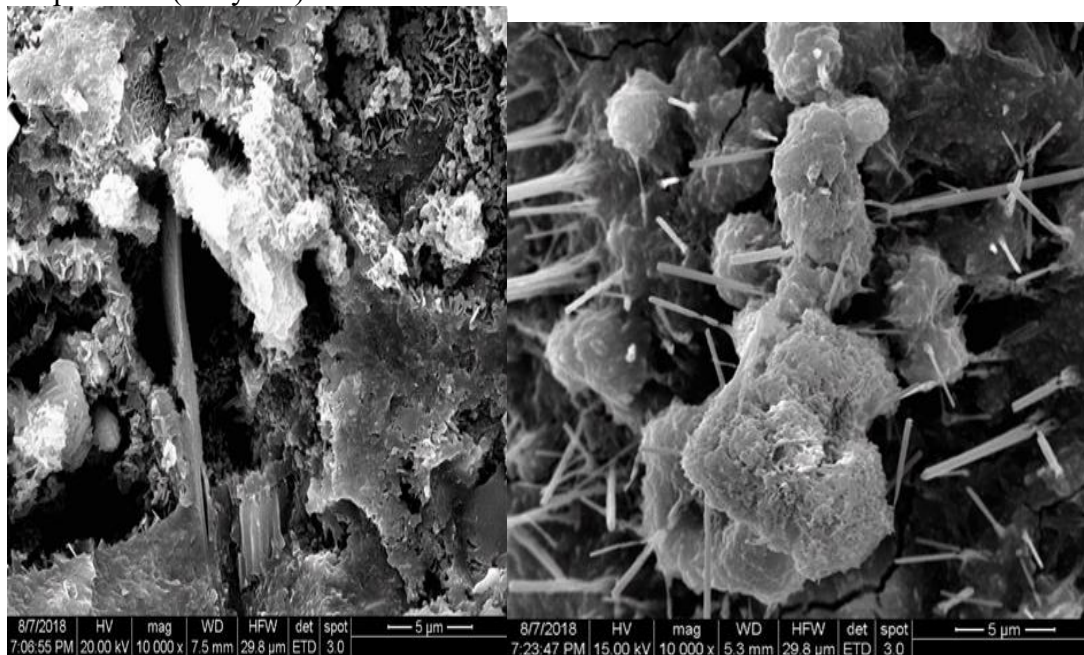


Рис. 1 – Микроструктура цементного камня  
без волновой обработки                      после волновой обработки

Прокачиваемость увеличивается на 15%, седиментационная устойчивость повышается в два раза, сроки твердения снижаются на 20%, прочность цементного камня повышается на 25%. Значения интегральных коэффициентов качества строительства скважин на объектах, где применялась технология, получены в пределах 0,82–0,92. Для сравнения, значения коэффициентов качества строительства на аналогичных скважинах, цементирование которых проводилось традиционным методом, лежали в диапазоне 0,66 – 0,77.

Волновая технология приготовления тампонажных растворов впервые в мире опробована в ПАО «Татнефть» и доказала свою эффективность.

[1]. Ганиев С.Р., Кузнецов Ю.С. Влияние волновой обработки на технологические характеристики тампонажного раствора в процессах разобщения пластов нефтяных и газовых скважин. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 2. С. 29-34.

[2]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Гранова Г.Н., Аверьянов А.П., Айдагулов Р.Р., Артамонов В.Ю., Брызгалов Е.А., Бутикова О.А., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р., Гришнев И.Н., Жебынев Д.А., Звягин А.В., Ильгамов М.А., Кислогубова О.Н., Кормилицын В.И., Корнеев А.С., Касилов В.П., Косьянчук В.В., Котельников В.А. и др. Фундаментальные основы волновых технологий обработки многокомпонентных жидких и вязких составов. Отчет о НИР. 2020.

## Характеристики волнового гидродинамического генератора плоского типа при изменении степени перекрытия потока цилиндрическими телами обтекания и давлении перед и за ними.

Ганиев С.Р., Шмырков О.В., Рудаков В.П., Курменев Д.В., Крюков А.В.  
Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия

### Цель

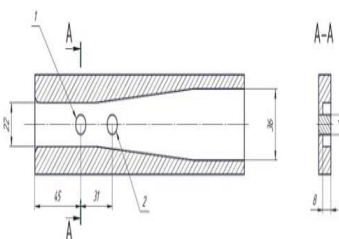
Работа посвящена экспериментальному исследованию течения и спектральных характеристик в проточном гидродинамическом генераторе плоского типа на гидродинамическом стенде экспериментальной базы НЦ НВМТ ИМАШ РАН при изменении степени перекрытия потока цилиндрическими телами обтекания  $S_t/S_0 = 510 - 82 \%$  при давлении на входе  $P_{вх} = 0,1 - 0,9$  МПа и числа  $Re = (0,5 - 5) \cdot 10^5$ ,

### Введение

Среди известных волновых устройств заметное место занимают проточные волновые генераторы, в плоских профилированных каналах которых установлены препятствия различных форм [1]. В этих генераторах для возбуждения мощных колебаний и волн в обрабатываемых средах, являющихся одновременно и рабочей средой, используются высокотурбулентные, срывные, вихревые потоки жидкости. В работе [2] представлены результаты экспериментальных исследований влияния степени перекрытия потока цилиндрическими телами обтекания на картину течения, гидродинамические и спектральные характеристики гидродинамического генератора плоского типа в широком диапазоне степени перекрытия потока в проточной части генератора и основных гидродинамических параметров. В настоящей работе помимо влияния степени перекрытия на указанные характеристики генератора показано её влияние на величину давления перед и за телами обтекания.

### Методы и средства эксперимента

Испытания проводились на гидродинамическом стенде, обеспечивающем при давлении на входе  $P_{вх} = 1,7$  МПа расход рабочей жидкости  $G = 500$  л/мин. Модель генератора представляла собой плоский канал шириной  $b = 22$  мм и высотой  $h = 8$  мм (Рис. 1).



- 1 - тело обтекания - цилиндр;
- 2 - пьезоэлектрический датчик давления

Рис. 1. Принципиальная схема проточного канала генератора плоского типа

В центре канала к нижней и верхней поверхности проточной части крепились цилиндры диаметрами  $d = 2 - 18$  мм. Степень перекрытия потока определялась отношением площади поперечного сечения цилиндра  $S_t$  к площади поперечного сечения канала  $S_0$  и составляла  $S_t/S_0 = 0,1 - 0,82$ . В качестве рабочего тела использовалась водопроводная вода при  $t = 15^\circ$ .

### Испытания и результаты.

В результате проведенных исследований получено:

- в проточной части гидродинамического генератора проточного типа за цилиндрическими телами обтекания при определённых значениях отношения  $P_{вых}/P_{вх}$ , являющихся постоянной величиной для каждого значения  $S_t/S_0$  реализуется течение с наличием попеременно образующихся вихрей, возникающих в результате отрыва пограничного слоя с поверхности тел обтекания и порождающих мощные пики давления резонансного типа, амплитуда которых более чем в 4 - 5 раза превышает максимальное значение входного давления;
- амплитуда резонансных пиков давления  $A_{max}$  с увеличением  $P_{вх}$  линейно возрастает;
- зависимость  $A_{max} = F(S_t/S_0)$  является существенно нелинейной с наличием характерного максимума при  $S_t/S_0 \approx 0,5$ , таким образом, наибольшая интенсивность волновых процессов реализуется при установке тел обтекания, диаметры которых лежат в диапазоне  $d = 8 - 13$  мм ( $S_t/S_0 = 0,35 - 0,6$ );
- частота возникновения максимальных пиков давления резонансного типа для каждого значения  $S_t/S_0$  с увеличением  $P_{вх}$  линейно возрастает, в то время как с увеличением  $S_t/S_0$  в диапазоне 0,1 - 0,82 снижается на порядок;
- зависимость числа Струхала от степени перекрытия потока  $St = F(S_t/S_0)$  в исследуемом диапазоне чисел  $Re = (0,5 - 5) \cdot 10^5$  носит линейный характер. С ростом  $S_t/S_0$  величина  $St$  увеличивается и при  $S_t/S_0 = 0,82$  достигает значения  $St = 1,2$ .

[1] Патент 2 306 972 МПК В01F 5/00. Устройство для гомогенизации и приготовления смесей./Ганиев Р.Ф., Кормилицын В.И., Украинский Л.Е. и др. 2007. Бюл. № 27.

[2] Ганиев С.Р., Шмырков О.В., Рудаков В.П. «Влияние кавитации и степени перекрытия потока цилиндрическими телами обтекания на картину течения, гидродинамические и спектральные характеристики гидродинамического генератора плоского типа» Доклады академии наук, 487, № 3, с. 252-256 (2019).

## Исследование технологии стимуляции пласта и увеличения нефтеотдачи с использованием волновых процессов и резонанса в продуктивных пластах

<sup>1,2</sup>Дубинский Г.С., <sup>1,2</sup>Чибицов А.В. <sup>2</sup>Андреев В.Е.

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
intnm-gsd@ya.ru

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

В настоящее время, в условиях падения добычи углеводородов, коэффициент извлечения нефти (КИН) в среднем не превышает 0,35-0,4, а эффективность работ по сохранению объемов добычи нефти и газа практически не отвечает экономической ситуации. Поэтому, обращается внимание на комплексные методы воздействия на продуктивные отложения с различным охватом залежи: от размера призабойной зоны пласта (ПЗП) до целых участков пласта. Такое воздействие на разработку дает наибольший эффект в сравнении с разовыми мероприятиями на объектах нефте- и газодобычи [1].

Выбор скважин-объектов воздействия и технологии – важнейший этап [2] и требует исследований в этом направлении. Целью работы является исследование процесса ВВ для увеличения корректности выбора технологических параметров ВВ.

Волновое воздействие (ВВ) вызывает распространение макроволн в пористой среде, насыщенной жидкостью, возбуждаются колебания в каждой поре. Микроколебания в порах и трещинах превращаются в макропотоки флюида. Выявлена зависимость скорости фильтрационного тока от частоты, указывающее на наличие диапазонов частот, в которых могут возникать значительные фильтрационные потоки. Явление связано с резонансами исходной продольной стоячей макроволны [2]. Интенсивность волнового воздействия на ПЗП будет наибольшей в случае достижения резонансных режимов волнового движения. Резонанс возникает, когда частоты внешнего волнового воздействия совпадают с собственными частотами обрабатываемых объектов.

Ранее при исследовании ВВ установлено влияние его продолжительности на изменение проницаемости [2], поэтому было исследовано и оценено влияние продолжительности ВВ на улучшение фильтрационных характеристик пористой среды. Для исследования использованы керны с различной начальной проницаемостью, но попарно с близкой проницаемостью:  $k_1 = 0,188$  мкм<sup>2</sup>,  $k_2 = 0,178$  мкм<sup>2</sup>,  $k_3 = 0,476$  мкм<sup>2</sup>,  $k_4 = 0,487$  мкм<sup>2</sup>. Время воздействия принято одинаковым для всех экспериментов. Создавались импульсы давления с амплитудой 0,3 и 0,4 МПа с частотой 4 Гц.

Установлено, что коэффициент проницаемости в процессе ВВ во всех случаях повышался с ростом продолжительности воздействия. Наибольшая скорость прироста проницаемости отмечена в первый час волнового (импульсного) воздействия и далее она уменьшалась. На кернах с меньшей проницаемостью после волновой обработки одинаковыми по амплитуде импульсами получено было большее относительное увеличение, в сравнении с более проницаемыми образцами. Увеличение амплитуды воздействия (при примерно одинаковой начальной проницаемости) также приводило к приросту проницаемости, следовательно, импульсы давления должны быть большими по величине, допустимыми для технического состояния скважины. Начальная проницаемость также влияет на величину ее относительного увеличения. При продолжительности ВВ более 40-60 минут во всех экспериментах отмечено падение прироста проницаемости, вероятно это связано перестройкой порово-трещинного пространства, выявленного ранее [3]. При различных видах ВВ происходит перестройка структуры порово-трещинного пространства и остановка ВВ в первые 20-40 минут, в зависимости от содержания глины в скелете коллектора, наличия коагулирующих глинистых частиц, может вызвать уменьшение проницаемости. Ясно, что эффективность ВВ на ПЗП зависит от большого количества факторов: амплитуды и частоты волнового воздействия (конструкция и особенности генератора), фильтрационно-емкостных свойств пласта, величины порово-трещинных каналов (диаметр, раскрытость, извилистость), присутствия глины в минеральном скелете коллектора и коагулянта. Следовательно, подбирать время ВВ необходимо с учетом всех факторов и по результатам опытных работ по ВВ в конкретных геолого-промысловых условиях. Важно создать резонансные условия [2] для получения максимальной эффективности обработки.

Выводы:

- прирост проницаемости при ВВ на флюидонасыщенную пористую среду зависит от продолжительности обработки и увеличивается с ростом этой продолжительности; она должна быть не менее 1 часа и ограничиваться временем, обоснованным при проведении экспериментов в конкретных условиях или при ОПИ, рекомендуется не допускать прекращения воздействия в первый час обработки;
- амплитуда колебаний давления должна иметь значительную и технически допустимую величину.

Работа выполнена при поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2020-900 в рамках программы развития НЦМУ.

[1]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Андреев В.Е. Котенев Ю.А. Проблемы и перспективы волновой технологии многофазных систем в нефтяной и газовой промышленности. – СПб.: ООО «Недра», 2008. – 214 с.

[2]. Ганиев О.Р., Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Резонансная макро- и микромеханика нефтяного пласта. Интенсификация добычи нефти и повышение нефтеотдачи. Наука и практика. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2014. – 256 с.

[3]. Кучумов Р.Я., Шагиев Р.Г. О влиянии виброударных волн на структуру порового пространства насыщенных пористых сред // Изд. Уфимский нефтяной институт» 1975, вып.39.- с.102-104.

# Вибрационная генерация ультразвука в нелинейно-упругих и нелинейно-вязкоупругих средах при условии фазово-группового синхронизма низкочастотных и высокочастотных волн

*Ерофеев В.И.*

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук», Нижний  
Новгород, Россия;

erof.vi@yandex.ru

Теоретически исследовано нелинейное взаимодействие квазигармонических продольных волн, распространяющихся в упругом и вязкоупругом материалах, содержащих полости. Считаем, что в среде в положительном направлении оси  $x$  распространяются волна  $W_2$  с частотой  $\omega_H$  и волновым числом  $k_H$  и волна  $W_1$  с частотой  $\omega_B$  и волновым числом  $k_B$ . При этом  $\omega_H \ll \omega_B$ , т.е. волну  $W_2$  отождествляем с вибрационным полем, а волну  $W_1$  – с ультразвуковым акустическим сигналом.

В результате взаимодействия двух волн на квадратичной нелинейности системы [1, 2] будет генерироваться волны  $W_1$  суммарной частоты, удовлетворяющая условиям трехчастотного резонансного взаимодействия

$$\omega_\Sigma = \omega_H + \omega_B, \quad k_\Sigma = k_H + k_B \quad (1)$$

Частота и волновое число вибрационного поля должны, при этом, подчиняться закону дисперсии уравнения Кортевега – де Вриза

$$\omega_H = c_2 k_H - g k_H^3, \quad (2)$$

а частоты и волновые числа ультразвука должны подчиняться закону дисперсии уравнения Шредингера, т.е. удовлетворять соотношениям:

$$\omega_B = a_1 k_B^2 + a_2, \quad \omega_\Sigma = a_1 k_\Sigma^2 + a_2. \quad (3)$$

Ультразвуковая волна суммарной частоты  $\omega_\Sigma$  должна, согласно поставленной задаче, подчиняться еще и условию фазово-группового синхронизма с вибрационным полем, т.е.

$$V_{гр\Sigma} = V_{\phi_H}, \quad (4)$$

где  $V_{гр\Sigma} = \frac{d\omega_\Sigma}{dk_\Sigma}$  – групповая скорость ультразвука,  $V_{\phi_H} = \omega_H / k_H$  – фазовая скорость вибрационного поля,  $a_{1,2}$  – параметры, включающие в себя плотность и модули упругости материала, средний диаметр полостей и количество полостей в единице объема.

Графическое решение системы уравнений (1)–(4) приведено на рисунке. При этом  $tg\theta = \frac{d\omega_\Sigma}{dk_\Sigma} = \frac{\omega_H}{k_H}$ .

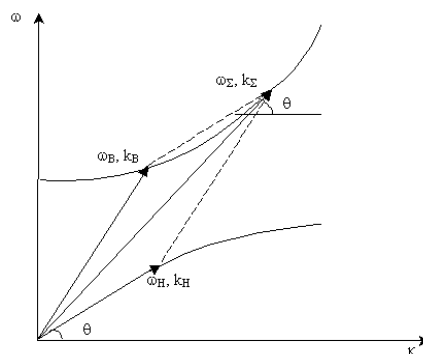


Рис. Графическое решение системы уравнений (1)–(4)

Приведенные расчеты качественно соответствуют данным о наблюдении генерации ультразвука сейсмическими воздействиями [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 20-19-00613).

[1]. Багдоев А.Г., Ерофеев В.И., Шекоян А.В. Линейные и нелинейные волны в диспергирующих сплошных средах. М.: Физматлит, 2009. 320 с.

[2]. Bagdov A.G., Erofeev V.I., Shekoyan A.V. Wave Dynamics of Generalized Continua. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 274 p.

[3]. Shin Y.S., Wambsganss M.W. Flow-Induced vibrations in IMFBR steam generators; A state of the art review. Nucl. Eng. and Des, 1977. Vol. 40, N 2, p. 221-285. Николаевский В.Н., Степанова Г.С. Нелинейная сейсмика и акустическое воздействие на нефтеотдачу пласта. Акустический журнал. 2005. Т.51, Приложение: выпуск «Геоакустика», с.150-159.

**Динамическое виброгашение в электрогенераторных установках переменной частоты вращения**  
**POWER DYNAMIC VIBRATION DAMPING IN ELECTRIC GENERATOR SETS WITH VARIABLE ROTATION SPEED**

*В.И. Ерофеев, д.ф.-м.н, профессор, директор института1,  
Г.Я. Пановко, д.т.н., профессор, гл. научн. сотр.2,  
А.С. Плехов, к.т.н., доцент3*

1Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия  
2Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
3Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Дизельные электрогенераторы с переменной частотой вращения вала двигателя внутреннего сгорания работают на оптимальной скорости, зависящей от электрической нагрузки со стороны потребителя. При работе генератора возникают значительные возмущающие воздействия переменной частоты. В докладе рассматривается динамический гаситель квазигармонических колебаний электрогенератора, настраиваемый на частоту антирезонанса. Для обеспечения эффективной работы гасителя при переменной частоте вращения генератора (возмущающего усилия) используется система управления, в которой в противофазе к колебаниям агрегата формируются синхронные импульсные воздействия на инерционную массу гасителя. Для исключения резонансных колебаний на собственных частотах двухмассовой системы в конструкцию гасителя вводится демпфер, совмещённый с магнитоэластичной упругой связью инерционной массы и рамы агрегата. Управление вязкостью и шириной петли гистерезиса магнитоэластичного элемента обеспечивает возможность настройки демпфера. Обсуждаются математическая модель и результаты имитационных экспериментов. Предложена конструкция лабораторного макета и система управления динамического гасителя вибрации.

Структурная схема системы виброгашения, содержащая релейный элемент с зоной нечувствительности, является объектом имитационных исследований. Введение в схему модуляторов (умножителей) позволяет изменять амплитуду импульсов тока в обмотке левитатора и уровень синхронизированного с квазигармоническим возмущением силового воздействия на инерционную массу. Применяемый релейный элемент с зоной нечувствительности является простейшим типовым нелинейным элементом, входной сигнал которого зависит только от входного сигнала и не зависит от частоты. Для таких элементов вычислены амплитудная характеристика и передаточная функция. Наличие в системе нелинейного элемента и элемента демпфирования обуславливает опасность возникновения автоколебаний масс с непредсказуемой частотой и амплитудой. Излагается алгоритм исследования системы в предположении присутствия на входе нелинейного элемента периодического возмущения. Решение получено посредством построения средствами компьютерной математики на комплексной плоскости годографов линейной части системы с приведенной передаточной функцией линейной части и нелинейного элемента.

Лабораторный макет импульсного виброгасителя реализован на базе разработанной авторами магнитоэологической гидропоры и резиновой обечайки, играющей роль мембраны, на которой установлена инерционная масса динамического виброгасителя [1]. Якорь (постоянный магнит) размещён на штоке, закрепленном в упругой обечайке-мембране и жёстко связанным с инерционной массой, помещён в поле электромагнита, питаемого импульсами тока определённой мощности, частоты и фазы. Импульсный характер тока определяет низкие уровни потребляемой мощности. Испытание лабораторного макета импульсного виброгасителя осуществлялось на стенде – модернизированном вибростоле ЭВ-341, содержащем два синхронизированных источника питания вибраторов ИВ-05-50. Вибраторы питаются от отдельных преобразователей частоты и реализуют частоты возбуждения в диапазоне от 5 до 100 Гц. Система управления виброгасителем включает в себя датчик частоты вращения ротора электрогенератора и датчики вибрации на базе трёх осевого акселерометра ADXL335С.

Синхронизация фазы импульсного сигнала по отношению к фазе квазигармонического вибровозмущения обеспечивается за счёт датчика частоты вращения дизель-генераторной установки. Энергия импульса, генерируемого в противофазе квазигармоническому сигналу вибровозмущения, подбирается автоматически в результате непрерывного измерения виброускорения защищаемой массы.

Результаты имитационных экспериментов позволяют судить о возможности снижения виброускорения при квазигармонических колебаниях на 35 дБ. Эксперименты с лабораторным стендом показывают возможность ослабления вибрации на 27 дБ.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 20-19-00372-П).

[1]. Ванягин А.В., Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Титов Д.Ю., Плехов А.С. Построение амплитудно-частотных характеристик магнитоуправляемой гидропоры с учетом присоединенной массы, зависящей от температуры// Вестник машиностроения, 2020, № 9. С. 47-56.



# Теория углеродных микро- и нанорезонаторов

Ильгамов М.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Среди многочисленных видов применения микро- и нанопленок, нанопроволок, нанотрубок может быть указано также использование их в качестве детекторов и сенсоров в электронике, оптоэлектронике, химии, биологии и т.д. [1–4]. Ввиду малой толщины пленки, проволоки и трубки адсорбированные на их поверхности молекулы вируса, ДНК и т.д. приводят к заметному изменению спектра частот резонатора. Ввиду уникального применения изучению их эксплуатационных свойств уделяется в литературе большое внимание. Например, в [4] дается обзор четырехсот статей, посвященных главным образом консольным резонаторам из нанопленок и нанопроволок.

Чем меньше резонатор, тем выше его чувствительность (добротность). Резонаторы могут иметь слоистую структуру в зависимости от предназначения. Поскольку для рассматриваемых резонаторов характерно большое отношение поверхности к объему, то поверхностные эффекты играют заметную роль в их динамике. Эти эффекты проявляются как правило обратно пропорционально толщине пленки и диаметру проволоки. При описании их динамики учитывались поверхностное натяжение, различие упругих свойств приповерхностного слоя и основного объема материала, термоупругая диссипация, влияние контактирующей среды и т.д. Однако до сих пор не учитывалось взаимодействие кривизны срединной поверхности пленки и осевой линии проволоки и среднего давления на их поверхностях в теории резонаторов. Такой учет был сделан в [5–7] для статической и динамической задачи изгиба проволоки и пленки. При этом учитывалось также указанное выше различие упругих свойств.

Упругая полоска с толщиной  $h$ , шириной  $b$  и длиной  $L$  закреплена на шарнирных опорах (рис. 1) Предполагаем, что наименьший размер  $h$  имеет порядок  $10\text{ nm}$  и отношение  $L/h$  имеет порядок  $10^1 - 10^3$ , причем  $h < b$ . Давления  $p_1, p_2$  действуют только на поверхности полосы. Конструкция опор исключает передачу осевых сил на пролет от давлений.

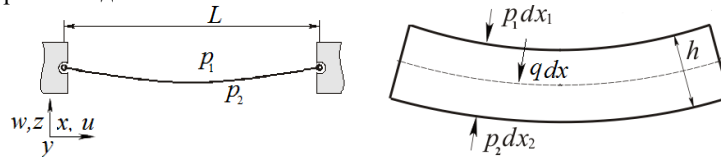


Рис. 1

Поперечная распределенная сила  $q$  через давления и прогиб  $w$  выражается формулой

$$q = (p_2 - p_1)b + p_m b h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad p_m = \frac{p_1 + p_2}{2}.$$

В случае  $p_1 = p_2 = p$  и колебаний с частотой  $\omega$  получаем уравнение

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} - 2\alpha \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} - k^2 w = 0, \quad \alpha = \frac{p b h L^2 (1 - \nu)}{2 E J (1 + \nu)}, \quad k^2 = \frac{\rho b h L^4 \omega^2}{E J},$$

где  $J$  – момент инерции,  $E, \nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона, в которых учитывается разность упругих характеристик приповерхностного слоя и основного объема.

Дан подробный анализ уравнения для различных граничных условий, отношения толщины к длине резонатора, разные проявления поверхностных эффектов в зависимости от входных параметров.

Спектр частот определяется формулой

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n^2 \pi c h}{2L^2} \sqrt{1 + \frac{2\alpha}{n^2 \pi^2}}, \quad c = \sqrt{\frac{E}{12(1 - \nu^2)\rho}}.$$

При  $E = 76 \cdot 10^3$  МПа,  $\nu = 0.25$ ,  $\rho = 10500$  кг/м<sup>3</sup>,  $h = 20$  нм,  $L = 2000$  нм,  $p = 5$  МПа второй член равен  $2\alpha/\pi^2 = 0.43$ . Первые две частоты равны  $f_1 = 7.865$ ,  $f_2 = 27.654$  МГц. Без учета поверхностных эффектов они равны  $f_1 = 6.565$ ,  $f_2 = 26.262$  МГц. С увеличением среднего давления собственные частоты возрастают.

Работа выполнена в рамках госзадания ИМАШ РАН.

[1]. Qian D., et. all. Mechanics of carbon nanotubes // Appl. Mech. Rev. 2002. V. 55. No 6. P. 495–532.

[2]. Burg, T.P., et. all. Weighing of biomolecules, single cells and single nanoparticles in fluid // Nature. 2007. V. 446. P. 1066–1069.

[3]. O’Connell A.D., et. all. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator // Nature. 2010. V. 464. P. 697–703.

[4]. Eom K., et. all. Nanomechanical resonators and their applications in biological/chemical detection: Nanomechanics principles // Physics Reports-Review Section of Physics Letters. 2011. V. 503. No 4–5. P. 115–163.

[5]. Ilgamov M. A., The influence of surface effects on bending and vibrations of nanofilms // Physics of the Solid State. 2019. V. 61. No 10. P. 1825–1830.

[6]. Ильгамов М.А. Спектр частот проволочного микро- и нанорезонатора // ДАН. 2020. Т. 494. С. 17–20.

[7]. Ilgamov M.A., Khakimov A.G. Influence of pressure on the frequency spectrum of micro and nanoresonators on hinged supports // J. Appl. Comput. Mech. 2021. V. 7. No 2. P. 977–983.

## Анализ состояния сложных технических систем при оценке динамических процессов с использованием бинарной нейронной сети

Конец Е.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
E-mail: 7653475@mail.ru

Для решения задач классификации, диагностики, оптимизации и управления процессами в технике нашли применение бинарные вопросники [1]. Появление и применение нейронных сетей во многом является развитием теории вопросников. Преимущество бинарных нейронных сетей состоит в их простом построении, быстродействии и низком энергопотреблении.

Известен метод использования бинарной нейронной сети для решения задачи выявления атак на распределенные информационные системы [2].

Данный подход применим для анализа состояния сложных технических систем (СТС), например энергетики или транспорта, с целью определения угроз их устойчивому функционированию.

Угрозы разделены на пять классов: внешнее воздействие; нарушение связи между объектами; утрата функциональности объекта; потеря наблюдаемости объекта; отсутствие права доступа к объекту.

Состояние системы считается опасным в текущий момент времени, если хотя бы один из ее объектов не наблюдаем или не функционален.

Рассматривается бинарная двухслойная нейронная сеть, входом которой является вектор наблюдений  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ , выходом - вектор угроз  $u(x)$ .

Конкретная угроза определенного класса это траектория в  $n$ -мерном пространстве наблюдаемых параметров  $H_i = (x(t), (x(t+\tau)), \dots, (x(t+k\tau)))$ , где  $\tau$  - период замеров значений параметров,  $H = (H_1, H_2, \dots, H_m)$  - множество траекторий всех угроз данного класса, а  $G(t) = G_1(t), G_2(t), \dots, G_i(t)$  - множество областей таких, что попадание замера  $x(t)$  в одну из них означает принадлежность траектории к множеству  $H$  на данном замере.

Покрывтие множества  $G$  представлено  $n$ -мерными параллелепипедами  $V_m$ , такое, что

$$G \subset \bigcup V_m = V, \quad V_m \cap V_j = \emptyset \text{ при } m \neq j,$$

и евклидов  $n$ -мерный объем всех  $M$  параллелепипедов, покрывающих множество  $G$ , отличается от объема (меры)  $G$  на величину, не превышающую  $\epsilon$ .

Задача состоит в определении принадлежности заданного вектора  $x \in R^n$  множеству  $G \subset R^n$ , сводится к задачам построения несвязных областей  $G$  для каждого интервала  $k$ -того замера и определения принадлежности замеренного состояния СТС к одной из этих областей  $x \in G$ .

Задана обучающая выборка  $x^j, j = 1, \dots, J$ , такая, что для любого  $x^j$  известно, что  $x^j \in G$  или  $x^j \notin G$ . Требуется построить нейронную сеть, решающую задачу принадлежности наблюдаемого состояния СТС к одной из областей множества  $G$ .

Сеть построена с помощью бинарной нелинейной функции Хевисайда  $\sigma(s) = 1$  при  $s \geq 0$  и  $\sigma(s) = 0$  при  $s < 0$ , аргументами которой являются координаты параллелепипеда в виде

$$\lambda_{mi} \leq x_i < \mu_{mi}, \quad i=1, \dots, n; \quad m=1, \dots, M. \quad (1)$$

Первый скрытый слой содержит  $nM$  узлов  $y$ , имеющих выходы

$$y_{mi} = y_{mi}(x_i) = \sigma(x_i - \lambda_{mi}) - \sigma(x_i - \mu_{mi}), \quad i = 1, \dots, n; \quad m = 1, \dots, M. \quad (2)$$

При этом  $y_{mi} = 1$  тогда и только тогда, когда имеет место (1). В противном случае  $y_{mi} = 0$ . Второй скрытый слой содержит  $M$  узлов  $z$ , выходы которых принимают значения

$$z_m = z_m(x) = \sigma\left(\sum_{i=1}^n y_{mi} - n + \frac{1}{2}\right), \quad m = 1, \dots, M. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) видно, что  $z_m = 1$  тогда и только тогда, когда вектор  $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in V$ . В противном случае  $z_m = 0$ . Другими словами второй скрытый слой сети отделяет параллелепипед  $V_m$  от других точек пространства  $R^n$ . Выходом сети является в данном случае единственный выход  $u$ , такой что

$$u = u(x) = \sigma\left(\sum_{m=1}^M z_m - \frac{1}{2}\right). \quad (4)$$

Из выражений (2)-(4) следует, что  $u=1$  тогда и только тогда, когда вектор

$$x = (x_1, \dots, x_n)^T \in V. \text{ В противном случае } u = 0.$$

Бинарная нейронная сеть (2)-(4) обладает способностью отделять множество  $V$ , аппроксимирующее с любой точностью исходное множество  $G$ , от других точек пространства  $R^n$ .

Доказано следующее свойство полученной бинарной нейронной сети [2]:

Любое измеримое множество  $G \in R^n$  может быть отделено от своего дополнения в  $R^n$  с помощью бинарной нейронной сети (2)-(4) с любой степенью точности, т.е. для любого  $\varepsilon > 0$  существует целое  $M$  и вещественные  $\lambda_{mi}$  и  $\mu_{mi}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $m = 1, \dots, M$ , такие, что мера множества ошибок первого и второго рода меньше  $\varepsilon$ , т.е.

$$\text{mes} (x \in G : u = 0 \cup x \notin G : u = 1) < \varepsilon. \quad (5)$$

Метод обучения построенной нейронной бинарной сети является прямой вычислительной процедурой, принципиальные ограничения на размерность задачи, обучающих последовательностей и точность распознавания отсутствуют.

[1]. Аржененко А. Ю, Чугаев Б.Н. Оптимальные бинарные вопросники. М.: Энергоатомиздат, 1989. - 128 с.

[2] Магницкий Н.А. Использование бинарной нейронной сети для обнаружения атак на ресурсы распределенных информационных систем // Динамика неоднородных систем. – М.: Институт системного анализа РАН, 2008. – с 200-205.

# Гидродинамическое моделирование трещин гидравлического разрыва пласта в низкопроницаемых трещинных коллекторах газовых залежей HYDRODYNAMIC MODELING OF FRACKING IN LOW-PERMEABILITY FRACTURED GAS RESERVOIR

*Р.В. Кузнецов, научный сотрудник, А.Н. Шандрыгин, главный научный сотрудник, д.т.н., Е.А. Rogov, ведущий научный сотрудник, к.т.н.,*

*В.В. Шишляев, начальник лаборатории*

Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий –  
Газпром ВНИИГАЗ

В настоящее время особый интерес приобретают вопросы освоения низкопроницаемых трещинных коллекторов газа со сложной иерархической структурой порово-трещинного пространства. К таким залежам относятся сенонские продуктивные отложения надсенонманской толщи, угольные пласты и другие. Разработка подобных низкопроницаемых коллекторов требует проведения дополнительных работ по интенсификации притока. Наиболее распространенным методом увеличением нефтегазоотдачи коллектора является гидравлический разрыв пласта (ГРП).

В коллекторах со сложной иерархической структурой порово-трещинного пространства хрупкость породы-коллектора может являться одним из ключевых параметров, определяющих морфологию развития трещин при планировании операций по гидроразрыву пласта. Она отражает сложность формирования и развития трещин ГРП. Горные породы с высоким модулем Юнга и низким коэффициентом Пуассона считаются более хрупкими, что способствует образованию сложной и множественной сети трещин во время проведения ГРП. Общий безразмерный показатель хрупкости породы можно выразить в следующем виде:

$$B = 0,5 \cdot \left( \frac{\nu - \nu_{max}}{\nu_{min} - \nu_{max}} + \frac{E - E_{max}}{E_{max} - E_{min}} \right), \quad (1)$$

где  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $\nu_{max}, \nu_{min}$  - максимальный и минимальный статические значения коэффициента Пуассона;  $E$  - модуль Юнга, Па;  $E_{max}, E_{min}$  - максимальный и минимальный статические значения модуля Юнга, Па.

На основе параметра хрупкости следует выбирать модель задания скважины с трещиной ГРП. Так при значениях хрупкости больше 40-60 геометрия порово-трещинного пространства после проведения интенсификации становится близко к системе трещин.

Основной вопрос при гидродинамическом моделировании разработки таких пород-коллекторов в полномасштабных моделях – возможность учета гибридных ГРП с комбинированными проппантными пачками при задании множественных трещин, а также воспроизведение оптимальной сети трещин в гидродинамических симуляторах [1].

Для выбора математических моделей, описывающих сформированные трещины, требуется привлечение дополнительной информации о физико-механических свойствах пород-коллекторов. Следует использовать дополнительные лабораторные замеры модуля Юнга и коэффициента Пуассона и результаты геофизических исследований скважин с применением волнового акустического широкополосного каротажа с кросс-дипольными источниками колебаний, а также интерпретации результатов сейсмических исследований для распространения геомеханических характеристик пласта в межскважинном пространстве. При этом помимо возникновения системы трещин необходимо учитывать всесторонние процессы, возникающие при эксплуатации газовых коллекторов [2].

Подходы, рассмотренные в докладе, позволят повысить качество адаптации гидродинамических моделей газовых и газоконденсатных месторождений с низкопроницаемыми трещинными коллекторами, а также помогут улучшить качество прогнозирования основных технологических показателей разработки.

[1]. Кузнецов Р.В., Шандрыгин А.Н., Шишляев В.В. Гидравлический разрыв пласта в полномасштабных гидродинамических моделях газовых месторождений // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность. Тез. докл. XI Международной научно-практической конференции. – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2023. – С. 41.

[2]. Кузнецов Р.В., Шишляев В.В. Моделирование разработки пластовых систем метаноугольных месторождений с учетом процессов усадки матрицы угля и сжимаемости системы трещин. Вести газовой науки, 2022. - № 3. - С. 207 - 216.

## Уникальная волновая технология получения сверхтяжёлых седиментационно-устойчивых буровых растворов

Кузнецов Ю.С., Кузнецов Р.Ю., Султанов Д.Р.

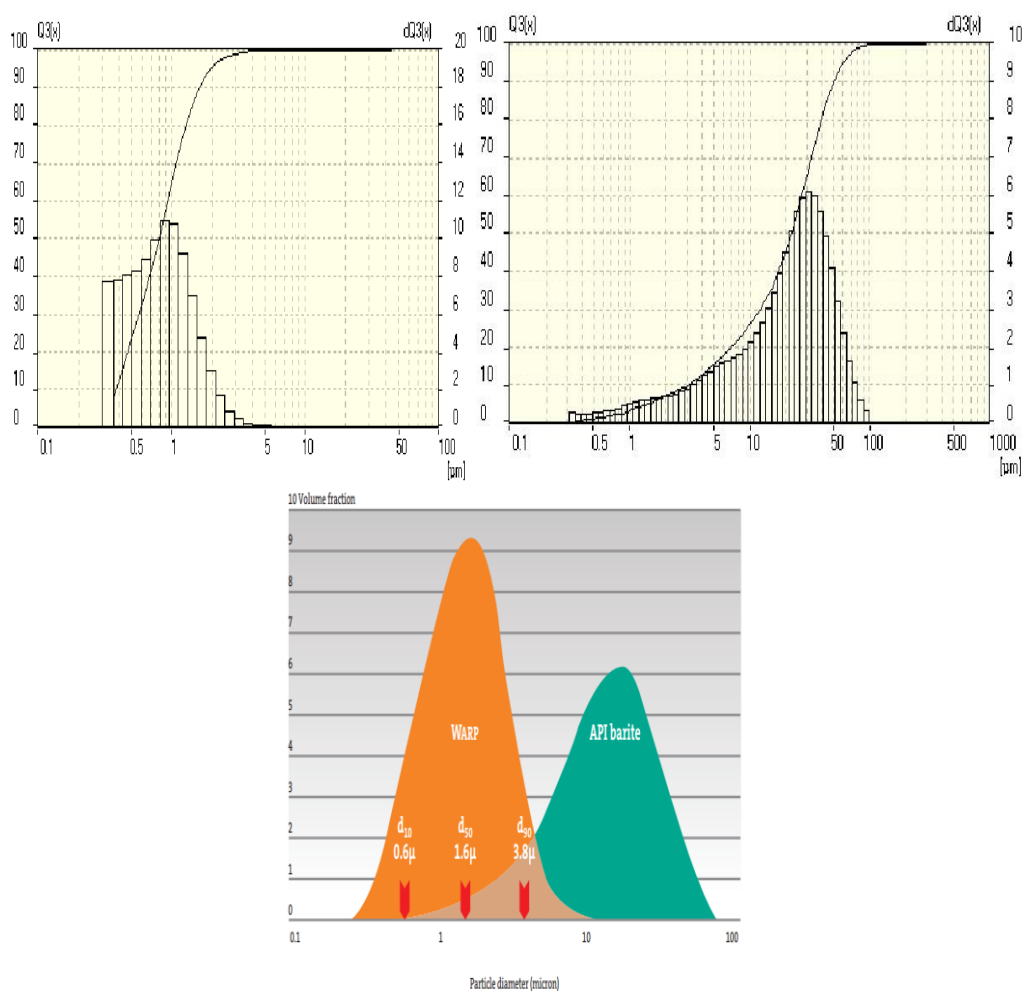
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*sultanov.dr@yandex.ru*

В результате проведенных исследований была предложена технология получения сверхтяжёлых седиментационно-устойчивых буровых растворов (на основе мелкодисперсного сульфата бария). В качестве импортозамещения технологии раствора WARP. Технология предусматривает химическое осаждение при наложении на процесс волнового поля, генерируемого волновым генератором проточного типа. Этот способ можно реализовать непосредственно в условиях буровой, что обеспечит существенную экономию времени и средств. В результате стендовых испытаний установлена возможность приготовления осажденного сульфата бария с размерами частиц 0,8-1,2 мкм.

Результаты измерений распределения размеров частиц твердой фазы в получаемом растворе, приготовленном с помощью волновой технологии (слева), и «API barite» (справа) приведены на Рисунке. Для сравнения приведён график распределения частиц по размерам раствора WARP.

На графиках видно, что полученный нами раствор аналогичен раствору WARP и даже превосходит его по дисперсности, а это основной фактор, придающий раствору его уникальные свойства.



[1]. Овчинников П.В., Кузнецов Ю.С., Артамонов В.Ю., Султанов Д.Р., Шульгина А.П., Кузнецова И.Б. Волновая технология приготовления бурового раствора, утяжеленного тонкодисперсным сульфатом бария. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 5 (329). С. 47-51.

[2] Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Гранова Г.Н., Аверьянов А.П., Айдагулов Р.Р., Артамонов В.Ю., Брызгалов Е.А., Бутикова О.А., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р., Гришняев И.Н., Жебынев Д.А., Звягин А.В., Ильгамов М.А., Кислогубова О.Н., Кормилицын В.И., Корнеев А.С., Касилов В.П., Косьянчук В.В., Котельников В.А. и др. Фундаментальные основы волновых технологий обработки многокомпонентных жидких и вязких составов. Отчет о НИР. 2020.

## Распространение поперечной волны в стохастической среде

Кукарских Л.А., Трифонов Г.И.

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия;  
trifonov\_gi@mail.ru

Распространение волн ведет к деформированию среды распространения. При деформировании двухкомпонентной среды, в направлении волновой поверхности распространяются волны двух типов [1]. Это продольные и поперечная волны. Построим модель распространения поперечных волн в стохастически неоднородных, насыщенных жидкостью, средах, которые часто встречаются в природе и широко применяются в различных процессах народного хозяйства. Характеристики распространения волн и волновой поверхности зависят от свойств среды. Выведем коэффициент затухания поперечной волны ( $\alpha$ ), зная радиус корреляции ( $\tau$ ), круговую частоту ( $\omega$ ), скорость поперечной волны ( $c$ ) и параметры, определяющие динамические свойства пористой среды ( $\gamma_{11}$ ,  $\gamma_{12}$ ,  $\gamma_{22}$ ) [2]. Определим влияние перечисленных параметров на коэффициент затухания поперечной волны.

Используя математическую теорию разрывов, основные соотношения, определяющие процесс динамического деформирования двухкомпонентной среды, получим следующую формулу для определения коэффициента затухания поперечной волны в стохастически неоднородной среде

$$\alpha = \frac{1}{2\tau\psi_1} \left( \psi_3 + \sqrt{r} \sin \frac{\phi}{2} \right), \quad (1)$$

где  $r = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}$ .

Угол найдем из выражения

$$\phi = \arcsin \frac{\beta_2}{\beta_1}, \quad (2)$$

$$\beta_1 = \tau^2 (\psi_2^2 - 4\psi_1\psi_5) - (\psi_3^2 + 4\psi_1\psi_4), \quad (3)$$

$$\beta_2 = \tau^2 (\psi_2^2 - 4\psi_1\psi_5) - (\psi_3^2 + 4\psi_1\psi_4). \quad (4)$$

Для упрощения формулы (1) были введены промежуточные переменные  $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6$ ,

где  $\psi_1 = (\gamma_{12}^2 - \pi(\gamma_{11}\gamma_{22} + \gamma_{12}^2))P_1^2P_2^2$ .

Обозначим отношение частоты к скорости волны через  $P_1$

$$P_1 = \omega/c, \quad (5)$$

$$P_2^2 = P_1^2 \frac{\gamma_{11}\gamma_{22} - \gamma_{12}^2}{\gamma_{22}}, \quad (6)$$

$$\psi_2 = -2(\gamma_{12}^2P_1^2P_2^2 + 2\pi\gamma_{11}\gamma_{12}^2P_1^4P_2), \quad (7)$$

$$\psi_3 = -2\gamma_{12}^2P_1^2P_2^2, \quad (8)$$

$$\psi_4 = -\gamma_{12}^2P_1^2P_2^2, \quad (9)$$

$$\psi_5 = \gamma_{12}^2P_1^2P_2^4 - 4\pi\gamma_{11}\gamma_{12}^2P_1^4P_2^2 + 4\pi^2(\gamma_{11}^2\gamma_{12}^2 - 2\gamma_{11}\gamma_{12}^2(\gamma_{11}\gamma_{22} + \gamma_{12}^2))P_1^6 \quad (10)$$

$$\psi_6 = 2(\gamma_{12}^2P_1^2P_2^3 + 2\pi\gamma_{11}\gamma_{12}^2P_1^4P_2) \quad (11)$$

Располагая исходными данными, можно проследить влияние характеристик среды на распространение волн. Решение технических задач с помощью построения математических моделей – это современное решение многих проблем, связанных с созданием новых nano технологий и nano материалов, которые представляют собой стохастические неоднородные двухкомпонентные и многокомпонентные среды и востребованы сейчас в связи с санкциями и новыми условиями развития страны.

[1] Поленов В.С., Чигарев А.В. Распространение волн в насыщенной жидкостью неоднородной пористой среде // Изв РАН. ПММ. 2010. Т. 74, Вып. 2. С. 276-284.

[2] Кукарских Л.А., Поленов В.С. О динамическом деформировании насыщенных жидкостью упругих пористых сред // БНТУ. Минск, 2014. Вып. 29. С. 73-79.

## Волновые процессы в уплотнениях высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков

Кушнир А.П.

email: gurinmura@yandex.ru

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

**Цель работы:** Обеспечение герметичности высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков.

**Состояние вопроса.** Герметичность динамических бесконтактных уплотнений, рис. 1, применяемых в высокоскоростных шпиндельных узлах металлорежущих станков, обычно оценивают зависимостью Шульц-Грунова (1) по положению радиуса  $R$  зеркала раздела фаз воздух-жидкость:

$$R = \sqrt{r_2^2 - \frac{2\Delta p_0}{\rho\beta^2\omega^2}}, \quad (1)$$

где  $\Delta p_0$  – внешний перепад давления, приложенный к уплотнению;  $\rho$  - плотность герметизируемой среды;  $\beta$  - коэффициент закрутки потока;  $\omega$  - угловая скорость шпинделя.

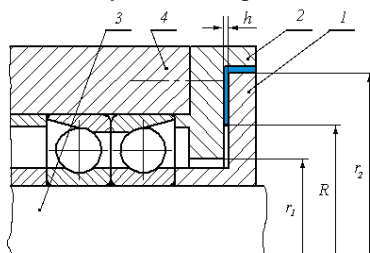


Рис. 1. Схема динамического бесконтактного уплотнения высокоскоростного шпиндельного узла

**Результаты эксперимента.** В соответствии с теоретической зависимостью (1) радиус раздела фаз  $R$  увеличивается с ростом угловой скорости шпинделя. Однако, как показали результаты исследований, это оказалось не совсем так. При малых скоростях выражение (1) отлично соотносится с результатами эксперимента. Однако при приближении радиуса  $R$  к наружному радиусу уплотнения  $r_2$ , происходит потеря устойчивости потока жидкости в зазоре уплотнения (рис. 2 а) и начинается автоколебательный процесс, амплитуда которого увеличивается с ростом угловой скорости шпинделя (рис. 2 б). Вследствие этого процесса происходит потеря герметичности уплотнения, что противоречит известным теориям герметичности.

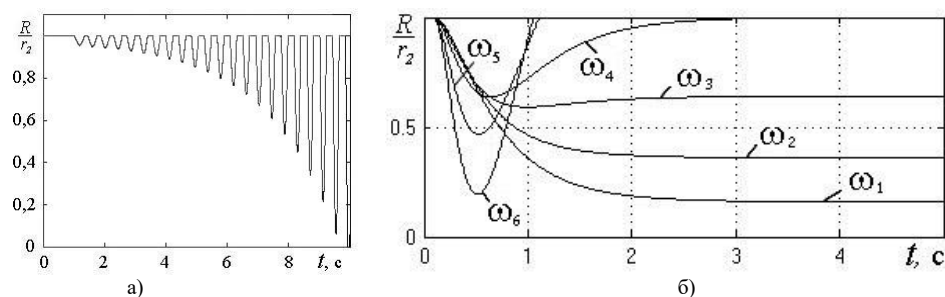


Рис. 2. Зависимость положения радиуса раздела фаз а) от времени; б) от угловой скорости шпинделя

**Выводы.**

1. Экспериментально показано, что зависимость Шульц-Грунова справедлива лишь в области средних угловых скоростей шпинделя, при которых утечки отсутствуют. При малых скоростях (вплоть до нулевых) имеет место статическая негерметичность, обусловленная недостаточно высоким напором, развиваемым уплотнением.

2. Впервые был обнаружен и описан эффект потери герметичности динамических бесконтактных уплотнений в области высоких скоростей шпинделя.

3. Потеря герметичности в области высоких скоростей вызвана появлением неустойчивого колебательного движения жидкости в зазоре уплотнения, интенсивность которого растет с повышением скорости вращения шпинделя.

[1] Kushnir A.P., Lizogub V.A. Contaminant transmission through contactless seals of machine-tool spindles. *Russian Engineering Research* volume 32, pages 395–398 (2012).

[2]. Kushnir A.P. Passage of pollutants through contactless seals with a motionless spindle. *Russian Engineering Research* volume 31, pages 53–55 (2011).

[3] Matthias Scherrer\* and Rudolf Scheidl. Theoretical and Experimental Analysis of a Non Contacting Elastohydrodynamic Sealing. Institute of Machine Design and Hydraulic Drives, Johannes Kepler University, Linz, Austria. Publication 29 April 2023.

<https://journals.riverpublishers.com/index.php/IJFP/article/view/12543/17965>

## Система мониторинга динамических параметров станков с ЧПУ

Кушнур А.П.

email: gurinmura@yandex.ru

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

**Цель работы:** Повышение надежности функционирования станков с ЧПУ.

**Традиционный подход к мониторингу.** Одним из важнейших контролируемых параметров в системе мониторинга состояния станков с ЧПУ является сила резания, приложенная к инструменту и шпиндельному узлу станка. Традиционный подход к оценке параметров мониторинга изложен в работе [1] и заключается в том, что автоматизированное тестирование главного привода перемещения осуществляется посредством мониторинга измеряемых диагностических параметров и сравнения их с эталонными значениями. В случае превышения допустимых значений система выдает соответствующий диагностический сигнал (уведомление о нарушениях технического состояния) или останавливает оборудование.

$$z(p_i) \geq z_{\max}(p_i), \quad (1)$$

где:  $p_i$  – диагностируемый параметр;  $z$  – результат измерения;  $z_{\max}$  – предельное значение параметра.

**Предлагаемое решение.** Следует отметить, что условие (1) применимо только к медленным или монотонно изменяющимся процессам. В случае оценки силы резания, которая представляется спектром колебаний с большим разбросом, данный подход приведет к ложному срабатыванию, рис. 1 а.

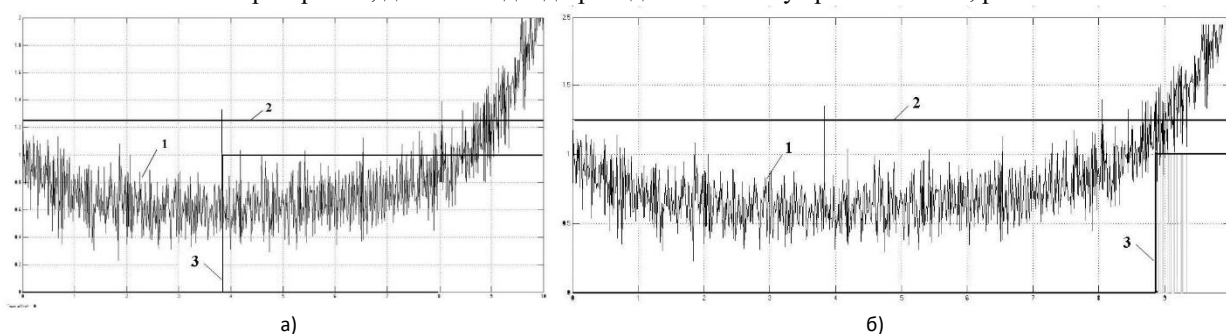


Рис. 1. Ложное срабатывание (а) и штатная работа системы мониторинга (б), где: 1 - сила резания; 2 - предельное значение силы резания; 3 - сигнал аларма

В работе предложен уточненный критерий оценки, который учитывает не только амплитуду контролируемого параметра, но и его длительность (2).

$$z(p_i) \geq z_{\max}(p_i) \Big|_{\Delta t \geq \Delta t_{\min}} \quad (2)$$

Как показывают результаты моделирования, уточненный критерий (2) позволяет более адекватно оценить эффективные нагрузки и избежать ложных срабатываний системы мониторинга, рис. 1 б.

Динамическая модель мониторинга была разработана в среде Matlab-Simulink и представлена на рис. 2.

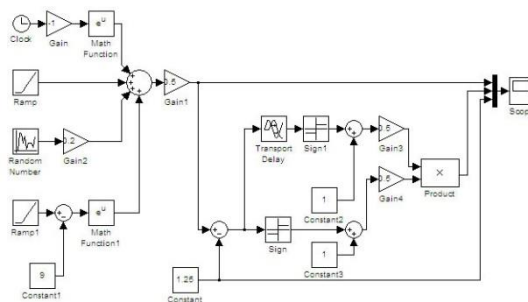


Рис. 2. Динамическая модель мониторинга в среде Matlab-Simulink

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 14.580.21.0008 по теме: "Разработка информационных и программных средств для управления автоматизацией высокотехнологичного оборудования в цифровом машиностроительном производстве".

[1]. Ваганов А.А., Писарев В.И. Система автоматизированного мониторинга технического состояния привода главного движения металлообрабатывающих станков с ЧПУ. ВИИ Всероссийская конференция «Актуальные проблемы машиностроения» 25-27.03.2015. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 17, №2(4), 2015. с. 725-731.

[2]. Stuart A. Boyer. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. International Society of Automation, 2010. - 257 p.



# Поддержание резонансных режимов работы вибрационных машин при переменных параметрах технологической нагрузки

Лян И.П.

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

lyanilyaimash@yandex.ru

## Цель

Целью исследований является совершенствование вибрационных технологических машин, работающих в резонансном режиме колебаний, при изменяющихся параметрах технологической нагрузки на рабочем органе.

## Проблематика

Одним из перспективных способов повышения энергоэффективности вибрационных транспортно-технологических машин является использование резонансных режимов колебаний рабочего органа, что позволяет увеличить КПД, существенно уменьшить металлоёмкость конструкции, снизить паразитную реактивную мощность привода [1,2].

Флуктуация параметров обрабатываемого материала (технологической нагрузки) могут приводить к изменению собственных частот и срыву (уводу) системы с резонансного режима колебаний. В этом случае поддержание амплитуд колебаний (виброскоростей или ускорений) при изменении массы обрабатываемого может быть обеспечено за счет использования системы автоматического управления частотой питания вибровозбудителей [1,3].

Задачами исследования являются:

- создание математической модели пространственной резонансной вибрационной машины с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями ограниченной мощности;
- разработка алгоритмов и технических решений для систем поддержания резонансных колебаний рабочего органа при изменении массы технологической нагрузки;
- проведение численных экспериментов и сравнение эффективности предлагаемых алгоритмов.

## Материалы и методы

При разработке расчетной схемы пространственной вибрационной машины учитывается возможное изменение массы обрабатываемого материала на рабочем органе, явление самосинхронизации дебалансов, а также ограниченная мощность вибровозбудителей с проводом от асинхронных двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором. Обрабатываемый материал моделируется как дополнительная сосредоточенная масса, расположенная на рабочем органе, при этом положение центра ее массы изменяется от текущей массы материала. Моментные характеристики двигателей описываются с помощью модифицированной формулы Клосса, учитывающей эффект скольжения в асинхронных двигателях и пропорциональный закон частотного регулирования. [4]

По результатам экспериментальных исследований произведена верификация параметров полученной математической модели.

На основе математической модели был сформирован динамический портрет вибромашины в виде непрерывной функции отклика системы от ее параметров во всем диапазоне их возможного изменения (частота питания, собственная частота).

Для решения задачи поддержания резонансных колебаний были предложены алгоритмы, основанные на использовании динамического портрета и ПИД-регулирования.

## Результаты и обсуждение.

Интеграция предложенных алгоритмов в разработанную математическую модель системы позволила создать цифровой двойник резонансного вибрационного грохота, снабженного системой автоматической настройки и поддержания резонансного режима колебаний. На основании результатов численных экспериментов при различных скоростях изменения массы обрабатываемого материала получены качественные и количественные оценки эффективности предлагаемых алгоритмов.

Оба алгоритма обеспечивают поддержание отклонения контролируемого параметра в пределах 5% от резонансного значения при медленных изменениях массы нагрузки. Однако настройка и поддержание резонансного режима с использованием алгоритма на основе динамического портрета происходила более точно и существенно быстрее. [5]

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского Научного Фонда, проект № 21-19-00183, <https://rscf.ru/project/21-19-00183>.

[1] Вибрации в технике: справочник в 6 т. /Под ред. Э.Э. Левендела – М.: Машиностроение -1981. Т. 4. 509 с.

[2] Федоренко И.Я. Вибрационные процессы и устройства в АПК – Барнаул: РИО Алт. ГАУ -2016. 289 с.

[3] Пановко Г.Я., Шохин А.Е. Динамика резонансных вибромашин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями – Ижевск: Институт компьютерных исследований -2020. 168 с.

[4] Lyan I., Panovko G., Shokhin A. Creation and Verification of Spatial Mathematical Model of Vibrating Machine with Two Self-synchronizing Unbalanced Exciters. J. of Vibroengineering. 2021 Vol. 23, N. 7, p. 1524–1534.

[5]. Крестниковский К.В., Лян И.П., Шохин А.Е. Сравнительный анализ алгоритмов настройки и поддержания резонансного режима работы вибрационных машин //Машиностроение и инженерное образование, 2022, N 3-4(70), С. 35-46.

## Определение параметров гидроудара для труб из композитов DETERMINATION OF WATER HAMMER PARAMETERS FOR PIPES MADE OF COMPOSITES

**В.В. Можаровский – профессор кафедры, гл.н.с., д.т.н., профессор**  
**С.В. Киргинцева – старший преподаватель, м.н.с.**

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

В работе исследуется явление гидравлического удара в однослойных и двухслойных ортотропных трубах из композита широко известным методом характеристик, с помощью которого представляется возможным определить напор (давление) и расход (скорость) движущейся жидкости [1, 2]. Для разработки математических моделей расчета скорости волны используется математическая теория упругости анизотропной среды, на основе концепций макромеханики. Скорость волны жидкости в ортотропной трубе определялась по разработанной методике [3]:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1+K\Omega}}$$

$$\Omega = \frac{-2}{1-(r_c/r_a)^{2k}} \left( \frac{1}{A_{11}k + A_{12}} + \frac{(r_c/r_a)^{2k}}{A_{11}k - A_{12}} \right); k = \sqrt{A_{22}/A_{11}}; A_{11} = E_r/(1-\nu_{r\theta}\nu_{\theta r}); A_{12} = \nu_{r\theta}E_\theta/(1-\nu_{r\theta}\nu_{\theta r});$$

$A_{22} = E_\theta/(1-\nu_{r\theta}\nu_{\theta r})$ ;  $r_c$  и  $r_a$  – внешний и внутренний радиусы трубы соответственно;  $K$  – модуль объемной упругости жидкости;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости; модули упругости материала трубы  $E_\theta$ ,  $E_r$  и коэффициенты Пуассона  $\nu_{\theta r}$ ,  $\nu_{r\theta}$  определяются по правилу «смесей» с объемным содержанием  $V$  волокна в матрице волокнистых материалов при различных способах расположения волокон [3].

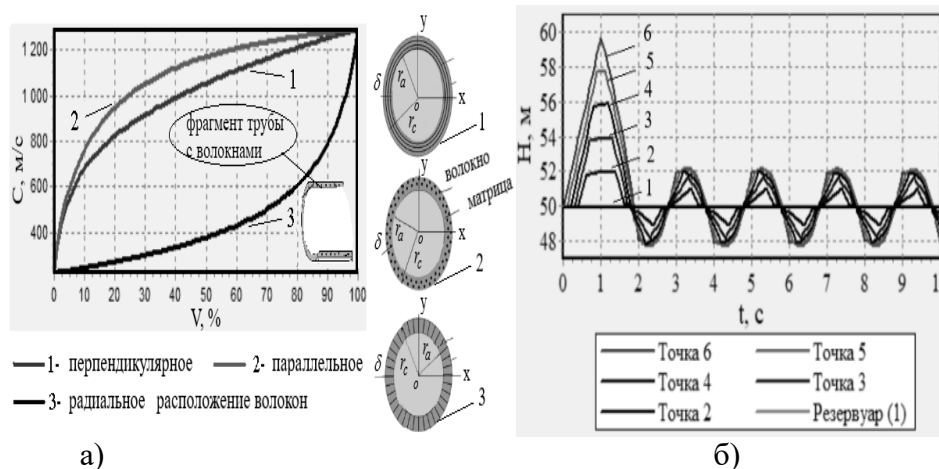
С помощью формул, предложенных известным российским ученым Н. Е. Жуковским, можно легко определять предельно возможное значение напора при гидравлическом ударе (прямой удар) [1]:

$$\Delta P = \pm \rho \cdot C \cdot V_0 \quad \text{или} \quad \Delta H = \pm C \cdot V_0 / g,$$

$\Delta P$  – ударное повышение давления;  $C$  – скорость ударной волны;  $g=9.82 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $H$  – пьезометрический напор;  $V_0 = 4Q/(\pi D^2)$  – скорость жидкости в трубе,  $Q$  – расход жидкости,  $D$  – внутренний диаметр трубы.

Проведен расчет и анализ результатов о влиянии физико-механических характеристик гидравлического удара на напор (давление) и расход жидкости на примере трубы из полиэтилена, усиленной обмоткой стальных волокон [4] с различными схемами армирования [3]. Построена методика и создана программа в среде Delphi, позволяющая определять параметры гидроудара в трубе из композита (скорость волны, напор и расход жидкости).

Рассмотрим трубу из композита длиной  $L=2500 \text{ м}$ , разделенную на 5 секций; задаются условия  $H_0=49.95 \text{ м}$ ;  $Q_0=0.1 \text{ м}^3/\text{с}$ ; коэффициент трения  $f=0.018$ ;  $T_{max}=50 \text{ с}$ ; время закрытия задвижки  $t_c=2.1 \text{ с}$ ; безразмерное время закрытия задвижки:  $\tau = (1-t/t_c)^s$ ,  $s=1.5$ . График зависимости скорости волны  $C$  от объемного содержания  $V$  и расположения волокон показан на рис.1а. Колебание давления в трубе рассчитывается в 5-и точках трубы для разного временного состояния при течении жидкости до положения задвижки. Результат представлен на рис.1б.



а)

б)

Рис.1 – а) График зависимости скорости волны  $C$  от объемного содержания  $V$  и расположения волокон в трубе из композита (толщина стенки  $\delta=0.018 \text{ м}$ );  
б) Графики зависимости напора  $H$  от времени  $t$  в определенных точках трубы ( $t_c=2.1 \text{ с}$ ;  $s=1.5$ ;  $V=1.48\%$ ) при перпендикулярном расположении волокон

Полученные результаты хорошо согласуются с другими экспериментальными и теоретическими данными. Проведены исследования, показывающие, что армирование может увеличить скорость ударной волны и вызвать дополнительные гидравлические скачки давления в трубопроводе, в основном, за счет увеличения объемного содержания  $V$  армирующих волокон в трубе из композита. Предложенный подход может также применяться при исследовании колебаний и волн в нефтяной и газовой отраслей промышленности.

[1]. Жуковский, Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. – М. Д. : Гостехтеоретлитиздат, 1949. – 104 с.

[2]. Rahul Kr. Garg. Analysis of Hydraulic Transients in a Reservoir-Valve-Pipeline Arrangement by Using Method of Characteristics (MOC) / Rahul Kr. Garg, Dr. Arun Kumar // Conference Paper, April 2018. – 9 p.

[3]. Можаровский, В. В. Скорость волны при гидроударе и напряженно-деформированное состояние слоистых футерованных труб из ортотропных материалов / В. В. Можаровский, С. В. Киргинцева // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 44-51.

[4]. Wuyi Wan. Shock wave speed and transient response of PE pipe with steel-mesh reinforcement / Wuyi Wan, Xinwei Mao // Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration, Vol.2016, Article ID 8705031. – 10 p.

## Методология определения контактных сил в случае прерывистой обкатки ротором статора

*Никифоров А.Н.*

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

Как известно, если  $[M]$  и  $[K]$  - исходные матрицы инерции и жесткости ротора в штатных подшипниках,  $\eta$  - коэффициент потерь упругой энергии в роторе и подшипниках, как положительная величина при прямой прецессии и отрицательная - при обратной,  $\{q\}$  и  $\{F\}$  - векторы-столбцы комплексных перемещений ротора и действующих на него сил/моментов, то роторную динамику можно выразить уравнением:

$$[M]\{\ddot{q}\} + (1 \pm i\eta)[K]\{q\} = \{F\}.$$

Соответственно задачу контактной роторной динамики можно решить численно в явном виде, исходя из:

$$\{\ddot{q}\} = [M]^{-1}\{F\} - (1 \pm i\eta)[M]^{-1}[K]\{q\}, \quad (1)$$

где  $\{F\}$  содержит контактные и другие доминирующие в системе «ротор-статор» силы.

Пусть в самой общей постановке у нестационарно вращающегося с угловой скоростью  $\dot{\varphi}$  гибкого ротора во всецело упругом статоре, определяющими/основными нагружениями являются силы динамической неуравновешенности от пары остаточных дисбалансов  $m_{0i}e_{0i}$  в концевых сечениях  $n$ -узловой ротора, нормального давления  $N$  и контактного трения  $T = \mu N$  в сечении с роторным узлом 2 и статорным узлом  $n+2$ :

$$\{F\}_{1 \times 2n} = \left\{ m_{01}e_{01}\dot{\varphi}^2 e^{i\varphi} \quad -N(1 \pm i\mu)e^{i\psi} \quad \dots \quad m_{02}e_{02}\dot{\varphi}^2 e^{i(\varphi+\gamma)} \quad 0 \quad N(1 \pm i\mu)e^{i\psi} \quad \dots \quad 0 \right\}^T.$$

Таким образом, в заданной системе ключевыми входными определениями при математическом описании/моделировании реальной динамики становятся зависимости  $N$  от деформации контактных поверхностей ( $\xi = e - \delta$ ) и  $\mu$  от скорости ротора относительно статора в месте контакта ( $V_{rel}$ ).

Для воспроизведения закона изменения контактной нагрузки в виде гистерезисной петли, в т.ч. для интегрирования (1) явным методом Рунге-Кутты, предложена следующая вязкоупругая модель контакта/удара с фазами нагружения «1» и разгрузки «2» ( $N=0$  если  $e < \delta$ ):

$$N = \begin{cases} N_1 = K\xi^{3/2}(1 + c_r c_0 \sqrt{1 - c_*^2}) & \text{если } e > \delta \text{ и } \dot{e} > 0 \\ N_2 = K\xi^{3/2}(1 - c_r c_0 \sqrt{1 - \xi^2/\xi_{max}^2}) & \text{если } e > \delta \text{ и } \dot{e} < 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Здесь или в месте контакта:  $K = \frac{4}{3} E_1 E_2 / (E_1 + E_2) \sqrt{rR/\delta}$ ,  $\delta$  - радиальный зазор,  $r$  - радиус ротора,  $R$  - радиус внутренней поверхности статора,  $E_{1,2}$  - модули упругости их материалов,  $c_r$  - коэффициент восстановления,  $c_0$  - коэффициент, зависящий от  $c_r$  (для стальных поверхностей  $c_r=0.5$ ,  $c_0=1.5$ ),  $c_* = 4/5$  - полуэмпирический коэф.,

$e = \sqrt{(\operatorname{Re} q_2 - \operatorname{Re} q_6)^2 + (\operatorname{Im} q_2 - \operatorname{Im} q_6)^2}$ ,  $\dot{e} = [(\operatorname{Re} \dot{q}_2 - \operatorname{Re} \dot{q}_6)(\operatorname{Re} q_2 - \operatorname{Re} q_6) + (\operatorname{Im} \dot{q}_2 - \operatorname{Im} \dot{q}_6)(\operatorname{Im} q_2 - \operatorname{Im} q_6)]/e$ ,  $e^{i\psi} = (q_2 - q_6)/e$ ,  $\xi_{max} = e_{max} - \delta$ ,  $e_{max}$  - максимальное относительное смещение по нормали к контактной линии/площадке в момент обнуления радиальной скорости ротора относительно статора ( $\dot{e} = 0$ ).

Задание физико-механических свойств силы сухого/полусухого трения, т.е. знака перед коэффициентом трения скольжения  $\mu$ , по аналогии с осциллятором с кулоновским трением в приложении к системе «ротор по статору» сводится к:

$$\operatorname{sign} \mu = \begin{cases} + & \text{если } V_{rel} = r\dot{\varphi} + e\dot{\psi} > 0 \\ - & \text{если } V_{rel} = r\dot{\varphi} + e\dot{\psi} < 0 \end{cases}, \text{ где}$$

$$\dot{\psi} = [(\operatorname{Im} \dot{q}_2 - \operatorname{Im} \dot{q}_6)(\operatorname{Re} q_2 - \operatorname{Re} q_6) - (\operatorname{Re} \dot{q}_2 - \operatorname{Re} \dot{q}_6)(\operatorname{Im} q_2 - \operatorname{Im} q_6)]/e^2.$$

Однако при таком теоретическом определении рассматриваемая система независимо от скорости вращения рано или поздно после нескольких соударений и некоторого безотрывного движения ротора по статору под действием силы  $\mu N$  переходит к прецессии (ротора) с угловой скоростью  $-\dot{\psi} = \dot{\varphi} r/\delta$ , т.е. к обкатыванию ротором статора без проскальзывания между ними, что не соответствует действительности. Как показали авторские натурные и вычислительные эксперименты, должно быть установление обратной прецессии ротора с угловой скоростью, близкой по модулю к той или иной частоте собственных колебаний системы ( $\tilde{\lambda}_i$ ), и существование обкатки с проскальзыванием. Это математически достигается при условиях:

$$\operatorname{sign} \mu = \begin{cases} + & \text{если нижеследующие неравенства не выполняются} \\ - & \text{если } -e\dot{\psi} < r\dot{\varphi} < \delta\tilde{\lambda}_i \text{ или } -e\dot{\psi} < \delta\tilde{\lambda}_i < r\dot{\varphi} \end{cases}. \quad (3)$$

В результате в отличие от предшествующих теоретических моделей [1, 2] использование на каждом шаге интегрирования условий (2) и (3) позволяет достоверно решать задачу как постоянной, так и прерывистой обкатки с проскальзыванием ротора по статору.

[1] Банах Л.Я. Некоторые явления, возникающие при движении вала в подшипнике с зазором // Машиноведение, 1965, №1. С.70-77.

[2] Денисов Г.Г., Неймарк Ю.И., Сандалов В.М., Цветков Ю.В. Об обкате ротора по жесткому подшипнику // Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1973. №6. С.4-13.

## Определение спектров релаксации напряжения в композитах. Часть II.

### Нелинейная вязко - упругость

О. Г. Новоженова

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

info – viniti@yandex.ru

В основе теории релаксации лежит процесс перехода системы к состоянию термодинамического равновесия после снятия внешней нагрузки и время, в течение которого осуществляется переход,  $\tau$  – время релаксации. Для любого релаксационного процесса наблюдается максимум на температурной зависимости коэффициента потерь. Наиболее интенсивный релаксационный переход соответствует температуре с стеклования  $T_g$  ( $\alpha$ -процесс). Этот переход обусловлен «размораживанием» сегментальной подвижности больших кинетических сегментов и ведет к максимальному изменению основных вязко - упругих характеристик полимеров. В результате динамические механические свойства полимера существенно зависят от температуры [1-2].

При малых амплитудах циклического сдвига (SAOS) ползучесть и релаксация полимеров описываются в рамках линейной вязко-упругости. Циклическое изменение напряжения и деформации можно наблюдать по изменению их относительно друг друга. Софазные напряжения и деформации (когда максимум напряжения совпадает с максимумом деформации) обращаются для линейно-упругого материала в прямую линию на графике  $\sigma - \epsilon$ . При сдвиге фазы на  $\pi/2$  для вязких материалов, (когда максимальное напряжение соответствует максимальной скорости деформации) получаем круговой график для линейно-вязкой или ньютоновской жидкости. Для вязко - упругого материала со сдвигом фазы  $\delta$ , где  $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$ , получаем эллипс. Для нелинейно упругого или нелинейно-вязкого материала эти графики были бы нелинейными кривыми или эллипсами вместо прямых и кругов (рис. 1)

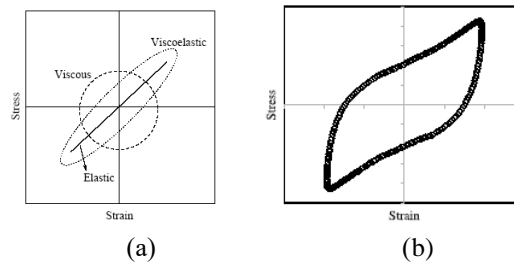


Рис.1 Циклические графики  $\sigma - \epsilon$  для различных материалов:  
(а) линейная и (б) нелинейная вязко-упругость

При циклическом сдвиговом нагружении

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) = G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t$$

где  $G'$  и  $G''$  - модули упругости и потерь соответственно.

По модели вязко-упругого материала Максвелла имеем:

$$G' = \int \frac{H(\lambda) \omega^2 \lambda}{1 + \omega^2 \lambda^2} d\lambda, \quad G'' = \int \frac{H(\lambda) \omega}{1 + \omega^2 \lambda^2} d\lambda,$$

где  $H(\lambda)$  – непрерывный спектр времен релаксации  $\lambda$ .

При циклическом сдвиге с большой амплитудой  $\gamma_0$  (LAOS) нелинейность вязко-упругого процесса описывается [3]:

$$\sigma = \sigma_0 (\gamma_0) \sin(\omega t + \delta).$$

Раскладывая  $\sigma(t)$  в ряд Фурье, получим

$$\sigma(t) = \sum_1^N \sigma_n \sin(n\omega t + \delta_n),$$

где  $\sigma_n$  и  $\delta_n$  - амплитуда и фазовый сдвиг n-ой гармоники. В случае линейной вязко-упругости или малых амплитуд (SAOS) имеем только первый член ряда.

Метод LAOS использован для расплавов и растворов полимеров, эмульсий, смесей, биогелей,...

[1]. Новоженова О.Г. Определение спектров релаксации напряжения в композитах. Часть I. Линейная вязко – упругость. 5-я международная научно-техническая конференция в дистанционном формате «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКом – 2020): Сборник трудов конференции(Москва, 27-29 октября 2020)/ М: Изд-во ИМАШ РАН, с. 184-187

[2]. Новоженова О.Г. Описание асимметричного спектра релаксации в вязкоупругих материалах и диэлектриках.- МКМ, 2019, т.,55, № 6, с.1185-1202.

[3]. Li X, Wang S-Q, Wang X (2009) Nonlinearity in large amplitude oscillatory shear (LAOS) of different viscoelastic materials. J Rheol 53(5):1255–1274

## Актуальные направления исследований с целью повышения эффективности строительства скважин

*Овчинников П.В.*

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

ovchinnikovpv@mail.ru

С целью с повышения эффективности, сокращения сроков и стоимости строительства скважин, достижения максимальных эксплуатационных характеристик нефтяных и газовых скважин, в последние годы, сложилась системная практика реализации наиболее перспективных технологий и решений в области бурения и заканчивания скважин [1]. При бурении скважин активно применяются верхние силовые привода и роторно-управляемые системы, современные типы долот и модели забойных двигателей, реализующие наиболее эффективные режимы и показатели бурения. Реализованы технология бурения на обсадных трубах и технология бурения с контролем давления (managed pressure drilling), освоена и серийно применяется практика строительства многоствольных (многозабойных) скважин с горизонтальным окончанием [2]. Выполняется постоянный поиск и внедрение современных буровых и тампонажных растворов [3]. Для выполнения геофизических работ используются системы каротажа в процессе бурения. При заканчивании скважин широко применяются: современные модели противопесчаных проволочных и сетчатых фильтров, фильтров с гравийной набивкой; заколонные набухающие пакера; оптоволоконные системы передачи данных; пассивные, адаптивные и активные устройств контроля притока. Освоены системы заканчивания боковых стволов высокого уровня сложности, интеллектуальные системы заканчивания и управления работой скважин. Реализации современных технологий при строительстве скважин в Российской Федерации позволила достигнуть ряда мировых рекордов.

Необходимо отметить актуальность задач совершенствования существующих технологий первичного вскрытия продуктивных пластов, изучению причин нарушения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов, разработки предложений по совершенствованию технологий при бурении в интервале продуктивного пласта и технологий интенсификации притока скважин. Решение этих задач с применением возможностей волновых технологий, подтверждается результатами теоретических исследований и промысловых испытаний и имеет определенный научный интерес и актуальность.

С применением специальных волновых устройств и технологий обосновано достижение степени кольматации до 98% и выше, многократное снижение объема проникновения фильтрата в пласт. Применение волновой обработки призабойной зоны пласта на гибких трубах подтверждает успешность освоения и повышения эксплуатационных характеристик скважин.

В качестве мероприятий по совершенствованию качества заканчивания скважин, актуально рассмотреть концепцию вскрытия продуктивных пластов, предусматривающую реализацию комплекса технологических решений:

- поддержание плотности бурового раствора минимально-возможной в соответствии с требованиями безопасности;
- применение волновой обработки для совершенствования состава твердой фазы и свойств буровых растворов [3] и вызове притока;
- реализация технологии бурения с управляемым давлением на забое (ее применение должно быть обосновано геолого-техническими условиями, показывает возможность существенного снижения потерь от поглощений, увеличения вводных дебитов скважин и извлечения нефти даже в сложных коллекторах с аномально-низким пластовым давлением).

### **Выводы**

Реализация рассмотренных технологий позволяет повысить эффективность и сократить сроки строительства скважин. Критерии и область эффективного применения каждой технологии, необходимо определять с учетом региональных условий производства работ, а также с учетом результатов научных исследований и моделирования процессов фильтрации для условий продуктивного пласта.

Работу по совершенствованию технологий бурения скважин необходимо проводить постоянно, оперативно реагируя на разработку новых решений и оборудования, уточнение геологических данных.

Устойчивое развитие отрасли требует решения задач импортозамещения высокотехнологичного оборудования и обеспечения технологического суверенитета в области современных технологий.

Рассмотренные решения и технологии, их составные задачи, вопросы научного, методического, инженерного и программного обеспечения для их реализации, могут быть потенциальными темами исследовательских и проектных работ.

[1]. Современные технические средства для строительства скважин с различными геологическими условиями: учебное пособие / В.П. Овчинников, В.И. Вяхирев, С.Н. Бастриков [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. – 209 с.

[2]. Сооружение многоствольных (многозабойных) скважин с горизонтальным окончанием / Д.Л. Бакиров, В.П. Овчинников, М.М. Фаттахов [и др.] // Нефтепромысловое дело. 2021. № 1 (625). С. 64-69.

[3]. Прорывные технологии в процессах диспергирования буровых и технологических жидкостей для бурения и освоения нефтяных и газовых скважин / Ю.С. Кузнецов, А.П. Аверьянов, С.Н. Бастриков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2022. № 4 (154). С. 93-102.

## Исследование свойств минерального порошка, подвергнутого ступенчатой волновой обработке

Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
paninss@nwmrc.ac.ru; briz911@mail.ru; nikiforyj@yandex.ru

### Цель

Создание новых технологий производства материалов на основе порошкообразных сыпучих сред является перспективным направлением для использования в различных областях промышленности (строительной, химической, фармацевтической и др.). Во многом, от качества обработки часто зависят свойства материалов.

При использовании машин и аппаратов, основанных на традиционных принципах действия, зачастую трудно обеспечить получение необходимых характеристик смесей, особенно для случаев, когда компоненты находятся в виде суспензии. Это связано с тем, что традиционные способы получения и обработки таких материалов во многом достигли предела своих возможностей. Прежде всего, это касается машин и механизмов, основанных на вращении рабочих органов.

Методы нелинейной волновой механики лишены множества недостатков, присущих традиционным методам обработки сыпучих материалов, и поэтому, на сегодняшний день являются актуальной темой для развития [1,2].

### Методы

В данной работе исследовалось влияние нелинейных волн на процессы сухого измельчения порошка гипсового вяжущего и его дальнейшего смешения с водой. Реализация принципов нелинейной волновой механики осуществлялась с помощью волновых устройств (смесителя (рис.1) и измельчителя (рис.2)) [1]



Рисунок 1

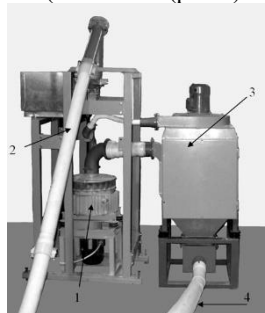


Рисунок 2

Смеситель-активатор (рис.1) предназначен для смешения и активации модифицирующих добавок и сухих смесей. Процесс волнового перемешивания происходит в цилиндрической рабочей камере. Внутри рабочей камеры располагается волновой рабочий элемент, совершающий колебательные движения с определенной частотой. Рабочий элемент является составной частью комплексного резонансного возбудителя колебаний, включающего также в себя резонансную систему и электрический генератор колебаний. Все элементы рабочей части смесителя смонтированы на станине. Рабочая среда подается в камеру в непрерывном режиме через входную горловину и, пройдя весь объем рабочей камеры, выходит через выпускную горловину.

Волновой измельчитель (рис.2) реализует технологии тонкого и сверхтонкого измельчения, формами движения которого являются волновая турбулизация двухфазной среды, состоящей из воздуха (или, при необходимости, другого газа) и частиц измельчаемого материала, использование для их разрушения волновых процессов. Основные конструктивные элементы: 1 – роторно-волновая мельница; 2 – линия подачи сырья; 3 – фильтр – отделитель; 4 – линия отведения готового продукта.

### Результаты:

Результаты оценивались в сравнении с образцами, полученными на традиционной лопастной мешалке.

Результаты волновой обработки оценивались по следующим показателям:

- Содержание кристаллизационной воды;
- Фазовый анализ гипсового вяжущего;
- Тонкость помола гипсового вяжущего;
- Контроль распада зерен;
- Определение сроков схватывания;
- Определение степени регидратации;
- Определение консистенции/текучести водогипсовой смеси;
- Определение прочности образцов.

Исследования показали, что волновое измельчение и последующее волновое перемешивание нивелировали выявленный резкий прирост показателей сроков схватывания, полученных при стандартном перемешивании суспензии лабораторной мешалкой после измельчения в волновом измельчителе.

[1] Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология – Москва: R&C Dynamics, –2008 г.–711с.

[2] Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении– Ижевск: R&C Dynamics –2012 г.–92с.



## **Модификация порошка минерального материала на основе гипса с помощью нелинейной волновой технологии**

**Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И.**

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН Москва, Россия  
paninss@nwmtc.ac.ru; briz911@mail.ru; nikiforyj@yandex.ru

### **Цель**

Получение новых данных о возможном применении волновых технологий в области получения и модификации строительных смесей на основе гипса.

### **Методы**

В данной работе исследовалось влияние нелинейных волн на изменение свойств сухого порошка гипсового вяжущего (активация). Реализация принципов нелинейной волновой механики осуществлялось с помощью волновых устройств (волновых смесителей и смесителей-активаторов) [1].

В работе применялись несколько видов волновых установок различных принципов действия, работающих как в проточном, так и в периодическом режиме.

### **Результаты**

Результаты волновой обработки оценивались по следующим показателям:

- Содержание кристаллизационной воды;
- Фазовый анализ гипсового вяжущего;
- Тонкость помола гипсового вяжущего;
- Контроль распада зерен;
- Определение сроков схватывания;
- Определение степени регидратации;
- Определение консистенции/текучести водогипсовой смеси;
- Определение прочности образцов.

Полученные результаты волновой обработки оценивались по сравнению с образцами из необработанного гипсового вяжущего.

**Результаты:** после оценки всех полученных показателей можно сделать вывод о существенном влиянии волновой обработки на свойства порошка гипсового вяжущего. Наиболее перспективные результаты с точки зрения дальнейшего развития данного направления показало применение волновых смесителей-активаторов, показавших существенное повышение прочностных характеристик и уменьшения сроков схватывания гипсового вяжущего, что в дальнейшем позволит уменьшить содержание дорогостоящих модифицирующих добавок или вовсе отказаться от их применения.

[1] Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении– Ижевск: R&C Dynamics –2012 г.–92с.

## Исследование свойств порошка гипсового вяжущего, подвергнутого ступенчатой волновой обработке

Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
paninss@nwmrc.ac.ru; briz911@mail.ru; nikiforyj@yandex.ru

### Цель

Получение новых данных о возможном применении волновых технологий в области получения и модификации строительных смесей на основе гипса.

### Методы

Ступенчатой волновой обработкой можно называть первоначальное волновое измельчение материала и последующее его волновое смешение с водой.

В данной работе исследовалось влияние нелинейных волн на процессы сухого измельчения порошка гипсового вяжущего и его дальнейшего смешения с водой. Реализация принципов нелинейной волновой механики осуществлялась с помощью волновых устройств (смесителя (рис.1) и измельчителя (рис.2)) [1].

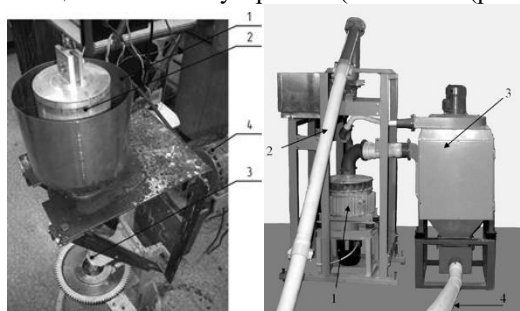


Рисунок 1

Рисунок 2

Смеситель (рис.1) состоит из сменной рабочей емкости (1), рабочего органа с установленными на нём особым образом телами - возбудителями несимметричного профиля (2). Рабочий орган совершает колебания, приводимый в движение комплексным резонансным приводом (3). Рабочий орган может собираться в различных вариациях формы и расположения активных элементов. Для более широкого изучения режимов смешения возможна организация вращения рабочей емкости (1) посредством привода (4).

Волновой измельчитель (рис.2) реализует технологии тонкого и сверхтонкого измельчения, формами движения которого являются волновая турбулизация двухфазной среды, состоящей из воздуха (или, при необходимости, другого газа) и частиц измельчаемого материала, использование для их разрушения волновых процессов. Основные конструктивные элементы: 1 – роторно-волновая мельница; 2 – линия подачи сырья; 3 – фильтр – отделитель; 4 – линия отведения готового продукта.

### Результаты:

Результаты оценивались в сравнении с образцами, полученными на традиционной лопастной мешалке. Результаты волновой обработки оценивались по следующим показателям:

- Содержание кристаллизационной воды;
- Фазовый анализ гипсового вяжущего;
- Тонкость помола гипсового вяжущего;
- Контроль распада зерен;
- Определение сроков схватывания;
- Определение степени регидратации;
- Определение консистенции/текучести водогипсовой смеси;
- Определение прочности образцов.

Исследования показали, что волновое измельчение и последующее волновое перемешивание нивелировали выявленный резкий прирост показателей сроков схватывания, полученных при стандартном перемешивании суспензии лабораторной мешалкой после измельчения в волновом измельчителе.

[1] Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении – Ижевск: R&C Dynamics –2012 г.–92с.

## **Исследования возможности резонансного волнового воздействия на степень пропитки стекловолокна связующим на основе полиэфирных смол**

*Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И., Довбненко М.С.*

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

[paninss@nwmtc.ac.ru](mailto:paninss@nwmtc.ac.ru); [briz911@mail.ru](mailto:briz911@mail.ru); [nikiforyj@yandex.ru](mailto:nikiforyj@yandex.ru); [dovbnenko\\_ms@mail.ru](mailto:dovbnenko_ms@mail.ru)

### **Цель**

Исследование возможности повышения качества перемешивания (повышение гомогенности) составляющих компаунда за счет применения волновых технологий.

Компаунд представляет собой сложную суспензию, состоящую из вязкой матрицы из полиэфирной смолы с жидкими добавками и частиц наполнителя, весьма отличающихся по размерам. Экспериментальная задача состояла в подборе оптимальных параметров резонансного режима вертикальных поступательных колебаний, при которых процесс проникновения жидкого связующего между волокнами наполнителя был бы наиболее интенсивным.

### **Методы**

Исходя из имеющихся наработок по тонкому перемешиванию сыпучих, вязких и многокомпонентных составов, поставленная задача решалась следующим образом:

Осуществлялось волновое перемешивание смолы с порошкообразными наполнителями на первой стадии и волновое перемешивание полученного пастообразного состава со стеклоровингом на второй стадии.

В качестве лабораторной установки, способной реализовать волновой принцип обработки материала, был использован вибрационный стол с установленным прозрачным стаканом цилиндрической формы, в который были помещены компоненты стеклонаполненного прессматериала (рис.1).



Рис. 1.

Неотверждённые образцы показывают равномерное распределение цвета, что говорит о хорошем распределении жидкого связующего в компонентах сыпучего и волокна наполнителя. (рис.2)

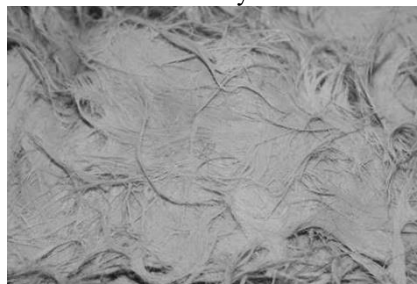


Рис.2

В результате проведения исследований была показана принципиальная возможность волновой пропитки волокон армирующего наполнителя высоковязким связующим.

### **Результаты**

Исследования показали, что:

-- волновыми методами и их сочетанием можно высокоэффективно получать тонкодисперсные смеси смол с минеральными наполнителями, причем это перемешивание может выполняться в одну стадию, со 100% наполнителей;

- получены интенсивные режимы волнового перемешивания тонкодисперсных смесей смол с порошковыми наполнителями, представляющих собой высоковязкие пастообразные составы, со стеклоровингом.

## **Исследования волнового перемешивания компонентов стеклонаполненного композита с помощью волнового гидродинамического смесителя**

*Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И., Довбненко М.С.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
paninss@nwmtc.ac.ru; briz911@mail.ru; nikiforyj@yandex.ru; dovbnenko\_ms@mail.ru

### **Цель**

Исследование возможности повышения качества перемешивания (повышение гомогенности) составляющих компаунда за счет применения волновых технологий.

В качестве возможного варианта технологии получения компаунда при постановке задачи рассматривался вариант перемешивания с внесением всех добавок в смолу одновременно в виде предварительно тонкоперемешанной смеси.

Такая смесь не является тонкодисперсной, так как в ней содержатся стеклянные волокна, имеющие значительную длину. В данном случае требуется применение дополнительных воздействий. Предварительные эксперименты показали, что такая смесь может быть получена в процессах, сочетающих волновые воздействия на среду с гравитационным воздействием тел качения. На микрофотографиях смеси, полученной в таком процессе, можно заметить глубокое проникновение тонкодисперсных частиц минерального наполнителя внутрь жгутов стекловолокна, что ведет к более равномерному распределению стекловолокон в массе компаунда. Полученная смесь сравнительно легко смешивается со смолами, поэтому такой вариант технологии также может оказаться перспективным.

### **Методы**

Спроектирован волновой смеситель (рис.1), принцип действия которого основан на генерировании волновых полей давления в обрабатываемой среде, получаемых при синхронном совмещении вращательного и колебательных принципов движения рабочих элементов конструкции специальной формы, сформированных при помощи волнового гидродинамического привода.



Рис. 1.

Конструкция волнового смесителя обеспечивает работу 2-х роторов с установленными рабочими элементами Z-образной формы с отличающимися частотами вращения. Циркуляционные рабочие органы (роторы) приводятся в действие гидродинамическим приводом с регулировкой по частотам вращения и колебания при помощи инверторов.

**Результаты:** несмотря на равномерное распределение компонентов в смеси, некоторые из отпрессованных образцов также имели неравномерную окраску и светлые пятна на поверхности различной интенсивности. При этом, образцы компаунда не имели заметной неравномерности окраски (рис.2).

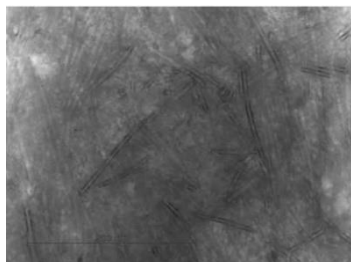


Рис.2

Одной из причин появления белёсых пятен в составе компаунда в дальнейшем является образование "гнезд" (перепутанных скоплений) из волокон стекловолокна при растекании компаунда при формовании через узкие сечения и отфильтровывание через них частиц минеральных наполнителей.

## Волновая деятельность био-антенных решеток и наследуемые биомеханические феномены

Петухов С.В., Свирин В.И.

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

Известны врожденные способности живых организмов, связанные с волновой деятельностью. К их числу относятся, например, способности эхолокации у дельфинов и летучих мышей, а также электролокации и электрорецепции у многих организмов, использующие, в частности, пьезоэлектрические свойства биологических тканей. Все наследуемые физиологические комплексы, обязаны быть структурно согласованными с системой генетического кодирования для того, чтобы быть генетически закодированными для передачи потомкам. Важную роль в этом согласовании и организации генетической системы играют принципы резонансов [1].

Изучением структурной связи молекулярной системы генетического кодирования с наследуемыми биомеханическими и биовибрационными феноменами занимается вибрационная генетическая биомеханика, развиваемая в лаборатории исследований биомеханических систем ИМАШ. Результативным алгебраическим инструментом анализа и моделирования генетических феноменов оказался матрично-тензорный анализ [2].

Созданные в этом подходе матрично-тензорные модели системы генетического кодирования неожиданно явили аналогии с известной тензорно-матричной теорией антенных решеток. Антенная решетка представляет собой объединения множества согласованных антенн в единую систему, эмерджентные свойства которой намного превышают функциональные возможности отдельной антенны. Антенные решетки разных размеров и конфигураций имеют исключительно широкие приложения в технике и с ними связывается ожидаемый революционный прогресс в компьютерных фотонных технологиях и энергетике использования солнечной энергии. Названные аналогии впервые поставили вопрос о возможной связи биологической эволюции с эмерджентными (системными) свойствами био-антенных решеток. Речь идет о том, что многие биомолекулы, как известно, могут работать в качестве отдельных антенн, но вопрос о биологическом значении системной работы множества согласованных био-антенн в составе био-антенной решетки никогда не ставился. Изучение этого вопроса привело к доктрине энергоинформационной эволюции на основе био-антенных решеток [3], опирающейся на множество выявленных фактов использования в живых организмах аналогов антенных решеток и их волновых функциональных особенностей. К числу этих аналогов относятся, например, следующие: фасеточные глаза насекомых как системные приемники электромагнитных волн оптического диапазона; волновая эхолокация и электрорецепция на базе обширных систем специализированных рецепторов; множества биофотонных кристаллов, формирующих биологические аналоги технических нано-антенных решеток и определяющих видовые узоры на крыльях бабочек и перьях павлинов.

Анализ и матрично-тензорное моделирование аналогий между техническими антенными решетками (зачастую называемых в литературе интеллектуальными антеннами) и их аналогами в живых организмах представляются полезными для новых подходов к пониманию биологических феноменов, связанных, например, с вибрационным и волновым перераспределением энергетических потоков в организме, а также для развития новых средств медицинской инженерии, регенерационных и других биотехнологий, искусственного интеллекта.

Излагаемая доктрина о роли волновой деятельности био-антенных решеток открывает дополнительные возможности для учета в проблемах биологической самоорганизации и генетической биомеханики достижений вибрационной и волновой механики [4]. Доклад представляет эти вопросы и материалы.

[1]. Petoukhov S.V. The system-resonance approach in modeling genetic structures. //Biosystems, 2016, v. 139, p. 1-11.

[2]. Петухов С.В. Матричная генетика, алгебры генетического кода, помехоустойчивость. – М.: РХД. – 2008. – 316 с.

[3]. Petoukhov S.V. The stochastic organization of genomes and the doctrine of energy-information evolution based on bio-antenna arrays. //Biosystems, 2022, 104712.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2022.104712>.

[4]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. – М.: ИИКИ. – 2011. – 780 с.

**Анализ динамических процессов с использованием оптико-интерференционных и оптико-цифровых методов**  
**ANALYSIS OF DYNAMIC PROCESSES USING OPTICAL-INTERFERENCE AND OPTICAL-DIGITAL METHODS**

*Разумовский И.А.<sup>1</sup> д.т.н., Одинцев И.Н.<sup>1</sup> к.т.н., Чернятин А.С.<sup>2</sup> к.т.н.*

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

<sup>2</sup>ООО «Транснефть»

В докладе представлен обзор специальных (оптических) средств для исследования нелинейных динамических процессов и виброповедения элементов конструкций. В частности, кратко сформулированы теоретические основы таких методов как классическая голографическая интерферометрия (ГИ), цифровая голография (ЦГ), электронная спекл-интерферометрия (ЭСИ) и корреляция цифровых изображений (КЦИ). В отличие от традиционных инструментов экспериментального анализа, перечисленные методы сочетают в себе бесконтактный характер измерений компонент вектора перемещений, высокую точность и максимальную информативность, что обеспечивает наибольшую степень достоверности получаемых результатов. Так, когерентно-оптические методы ГИ и ЭСИ используются для визуализации полей перемещений на поверхности исследуемых объектов в форме картин линий уровня [1, 2]. Основанные на применении видеокамер и компьютерных технологий методы ЦГ и КЦИ позволяют получать ту же информацию непосредственно в цифровом виде, что выводит эксперимент на новый качественный уровень как с точки зрения более корректной постановки задач, так и полной автоматизации процедуры обработки первичных данных [3, 4].

Широкие возможности рассматриваемых методов, открывающиеся при реализации научных и инженерных экспериментов, продемонстрированы на множестве практических примеров. В том числе, представлены методические разработки и результаты исследований виброхарактеристик механических объектов, выполненных специалистами ИМАШ РАН. Как известно [1, 2], методы ГИ и ЭСИ в их различных модификациях активно используются как для регистрации частот резонансных колебаний тел, так и для визуализации соответствующих им полей амплитуд, рис. 1, 2. Численный анализ интерферограмм колебаний на околорезонансных частотах позволяет построить участки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) с последующей оценкой по ним значений декремента колебаний [5], рис. 3. Практический интерес вызывают результаты исследования виброхарактеристик объектов, контактирующих с жидкой средой [6, 7], рис. 4.

Оптические методы модального анализа могут эффективно использоваться и для оценки дефектности, процессов накопления повреждений и разрушения рис.5, 6. Соответствующий подход основан на разработанной в ИМАШ РАН методологии определения параметров механического состояния исследуемого объекта на основе минимизации невязки между большими массивами экспериментальных данных и результатами численного решения серии модельных задач при текущих значениях искомых параметров [8].

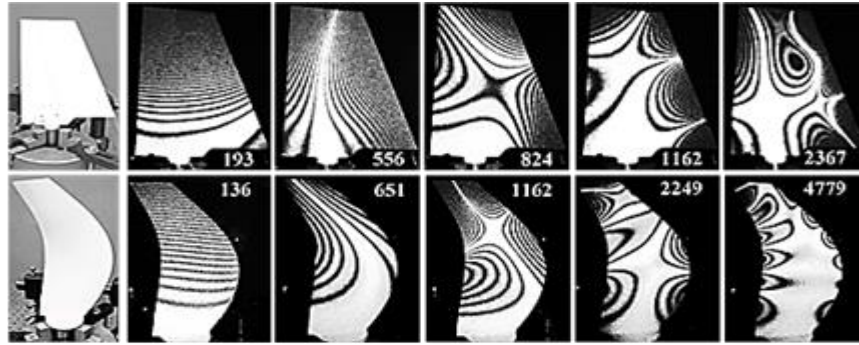


Рис.1. Голографические интерферограммы форм резонансных колебаний элементов авиационных конструкций. (Указаны значения частот в Гц.)



Рис.2. Спекл-интерферограммы форм колебаний композитного (анизотропного) диска с центральным жестким креплением.

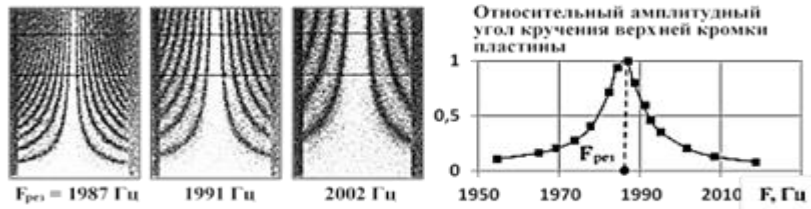


Рис.3. Построение АЧХ консольно-защемленной алюминиевой пластины по данным спекл-интерферометрии.

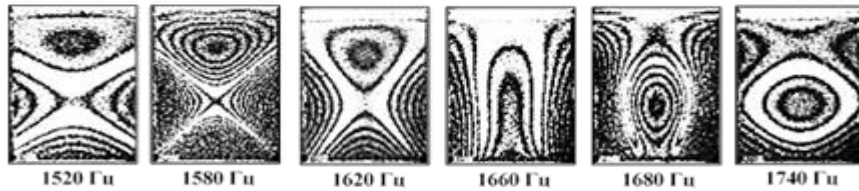


Рис.4. Спекл-интерферограммы, отражающие плавное преобразование форм колебаний консольно-защемленной пластины, помещенной в воду.

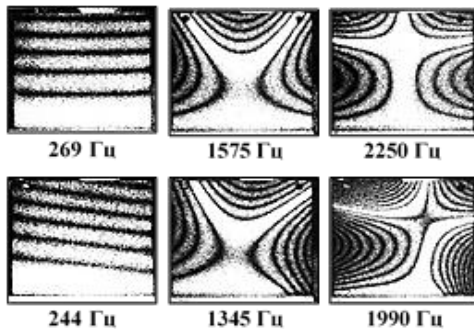


Рис.5. Спекл-интерферограммы форм колебаний консольно-защемленной пластины: бездефектной (верхний ряд) и со скрытым трещиноподобным дефектом по линии заделки (нижний ряд).

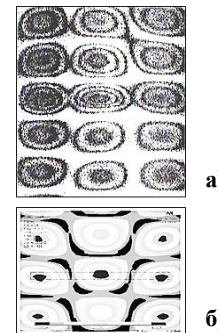


Рис.6. Фрагменты реальной (а) и модельной (б) картин полос для формы резонансных колебаний цилиндрической оболочки с на частоте 77 кГц имитатором трещины на внутренней поверхности.

[1] Shchepinov V.P., Pisarev V.S., Novikov S.A., Balalov V.V., Odintsev I.N., Bondarenko M.M. Strain and stress analysis by holographic and speckle interferometry. – Chichester: John Wiley & Sons. 1996. 496 p.

[2] Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. – М.: Изд. МГТУ. 2007. 240 с.

[3] Алексеенко И.В., Гусев М.Е. Цифровая голографическая интерферометрия широкого спектрального диапазона в системах неразрушающего контроля динамики микро- и макросистем // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 8. С. 626–631.

- [4] Sutton M.A., Ortu J.-J., Schreier H.W. Image Correlation for shape, motion and deformation measurements. Springer. 2009. 331 p.
- [5] Одинцов И.Н., Разумовский И.А. Методы когерентно-оптической виброметрии в практике механических испытаний // Приборы . 2010. №9. С.28-36.
- [6] Odintsev I.N., Sizarev V.D., Razumovsky I.A., Apalkov A.A. Holographic interferometry for the modal analysis of the structural elements in a liquid. Proc. of the 8th Int. Conf. on Flow Inductor Vibration (FIV 2004). Paris. 2004. V. 1. P. 301-306.
- [7] Odintsev I.N. Application of electronic speckle pattern interferometry to the study of the vibration of solids in liquid media // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2018) / AIP Conference Proceedings 2053, 040064. Published by AIP Publishing, 2018. – P.040064-1 – 040064-4.
- [8] Разумовский И.А., Чернятин А.С. Оценка размеров внутренних дефектов по полям виброперемещений, зарегистрированным когерентно-оптическими методами // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2019. №7. С. 38-45.  
Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 20-19-00769 П



**Самоотклоняющаяся кислотная композиция**  
**ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ**  
**THE SELF-DEVIATING ACID COMPOSITION FOR PROCESSING OF THE**  
**BOTTOMHOLE ZONE**

*Е.А. Рогов, ведущий научный сотрудник, к.т.н.*

Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий –  
Газпром ВНИИГАЗ

В процессе вскрытия продуктивных горизонтов в призабойной зоне пласта (ПЗП) происходит целый ряд необратимых физических и химических процессов: изменяется напряженное состояние горных пород, наблюдается проникновение вглубь пласта-коллектора как фильтрата и твердой фазы, так и самого бурового раствора, а также набухание глинистых частиц межзернового цементирующего материала. В результате существенно снижается проницаемость продуктивного пласта и, как следствие, исключается получение потенциально возможного притока нефти или газа.

Анализ научной литературы показывает основные причины снижения производительности эксплуатационных скважин [1, 2]:

- коагуляция стенок скважины и порового пространства частицами буровых растворов;
- набухание коллектора в результате изменения свойств насыщающего флюида из-за попадания в пласт фильтрата технологических растворов;
- адсорбция компонентов фильтрата бурового раствора и жидкости перфорации на поверхности пор и удерживание их различными силами, в том числе электрической природы;
- механическая деформация пласта в пристволевой части при бурении и перфорации;
- выпадение в осадок солей в результате взаимодействия фильтрата бурового раствора и жидкости перфорации с пластовой водой.

На нефтегазодобывающих предприятиях в настоящее время наиболее востребованным методом повышения производительности эксплуатационных скважин является обработка ПЗП физико-химическими активными составами технологических жидкостей на основе водных растворов минеральных и органических кислот, их смесей, дополнительно содержащих полимеры, поверхностно-активные вещества. Однако, несмотря на применение новых технологий и различных рецептур кислотных композиций, еще значительное количество эксплуатационных скважин эксплуатируется с дебитами значительно меньше потенциальных.

При разработке эффективного состава самоотклоняющейся кислотной композиции для обработки призабойной зоны скважины необходимо учитывать следующие основные параметры: минералогический состав горной породы, скорости протекания химических реакций кислот с различными минералами пласта, степень растворения пород, пластовая температура, состав и свойства пластовых флюидов.

В ООО «Газпром ВНИИГАЗ» разработана самоотклоняющаяся кислотная композиция для обработки ПЗП на основе оксиэтилендифосфоновой кислоты с добавкой поверхностно-активного вещества альфа олефинсульфонат натрия [3], обладающая следующими основными функциями:

- снижение скин-фактора, посредством удаления минеральных и органических отложений из призабойной зоны продуктивного пласта;
- повышение гидропроводности низкопроницаемых участков продуктивного пласта;
- выравнивание профиля притока эксплуатационных скважин;
- выравнивание профиля приемистости поглощающих скважин.

В промышленных условиях технологические операции по обработке ПЗП осуществляются следующим образом. На устье скважины готовят водный раствор бикарбоната натрия со сшивателем. В качестве сшивателя используются хромокалиевые квасцы или алюмокалиевые квасцы. Далее приготовленный раствор с помощью агрегата ЦА-320 нагнетается в насосно-компрессорные трубы (НКТ). Затем в продуктивный пласт закачивается буферная жидкость (дизельное топливо). После этого в НКТ нагнетается кислотный раствор на основе оксиэтилидендифосфоновой кислоты с добавкой альфа олефинсульфонат натрия. В результате смешения растворов в высокопроницаемом пропластке призабойной зоны скважины образуется блокирующая интервал пена и закачанный следом раствор кислоты отклоняется в направлении к низкопроницаемой зоне пласта.

Таким образом, совершенствование рецептур самоотклоняющихся кислотных композиций и технологий их применения для обработок ПЗП в условиях заданного минералогического состава терригенного пласта позволит существенно увеличить производительность эксплуатационных скважин.

- [1]. Иванов С.И. Интенсификация притока нефти и газа к скважинам. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. - 565 с.  
[2]. Shafiq, M. U., Mahmud, H. B. Sandstone matrix acidizing knowledge and future development. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. - 2017. - V. 7. - P. 1205 - 1216.  
[3]. Патент РФ № 2559267. Состав для обработки призабойной зоны пласта терригенных коллекторов / Рогов Е.А. (Россия). Заявка № 2014125461/03 от 24.06.2014. Опубликовано 10.08.2015. Бюл. № 22.

## Опыт применения технологии плазменно-импульсного воздействия на пласт EXPERIENCE OF APPLICATION TECHNOLOGY OF PLASMA IMPULSE EXCITATION ON LAYER

*Е.А. Rogov, ведущий научный сотрудник, к.т.н., Р.А. Жирнов, директор  
центра, к.т.н., Кузнецов Р.В., научный сотрудник, К.А. Полозков, начальник лаборатории, к.т.н.*

Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий –  
Газпром ВНИИГАЗ

На завершающей стадии разработки месторождений с целью поддержания добычи углеводородов на проектном уровне используются различные методы и способы увеличения нефтегазоотдачи пластов, в основном физико-химические [1 - 3]. Однако, в связи с поддержанием экологической безопасности при разработке нефтяных месторождений целесообразно использовать методы, не оказывающие разрушающего воздействия на продуктивные пласты.

Плазменно-импульсное воздействие (ПИВ) является один из таких методов интенсификации притока, основанный на использовании резонансных свойств пласта. Метод заключается в повышении проницаемости и пьезопроводности продуктивного пласта за счёт создания разветвлённой системы микротрещин и изменения динамических характеристик пластового флюида. При использовании ПИВ увеличивается проницаемость призабойной зоны пласта (ПЗП), восстанавливается гидродинамическая связь продуктивного пласта с забоем скважины за счет очистки старых и создания новых фильтрационных каналов. Кроме того, происходит очищение порового пространства и формирование новых микротрещин в ПЗП и фильтрационных каналах пласта.

Технология ПИВ создает контролируемую плазменную дугу внутри пласта, при этом за долю секунды выделяется значительное количество тепла с последующей высокоскоростной гидравлической импульсной волной, силы которой достаточно, чтобы удалить кольматирующие отложения, закупоривающие ПЗП, без вреда для стальных конструкций. Эффект от очистки ПЗП, повышения относительной подвижности флюида, а также генерации упругих колебаний и их резонансного взаимодействия сохраняется и после проведения операций по интенсификации притока с помощью ПИВ, поддерживая тем самым повышенную производительность скважины на срок до двух лет и более.

С целью повышения интенсификации притока в эксплуатационной скважине на одном из нефтяных месторождений Восточной Сибири проведены опытно-промышленные испытания ПИВ на продуктивный горизонт. Последовательность проведения операций заключается в следующем. Генератор ПИВ размещается напротив интервала перфорации. Иницируется взрыв металлического проводника, происходит образование плазмы, сопровождаемое скачком уплотнения. Возникающая ударная волна через перфорационные каналы проникает в продуктивный пласт, стимулируя упругие колебания. Охлаждение плазмы и высокое пластовое давление приводят к выносу кольматирующих образований из скважины, а ударная волна переходит в объемные упругие колебания.

Прирост дебита после проведения ПИВ составил 0,65 т/сут. Основные параметры до и после проведения ПИВ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры до и после проведения ПИВ.

Дебит нефти, т/сут		Давление на забое, МПа		Температура, °С	
до ПИВ	после ПИВ	до ПИВ	после ПИВ	до ПИВ	после ПИВ
1,65	2,30	9,15	9,16	63,5	63,5

Таким образом, по результатам проведенных опытно-промышленных испытаний основными преимуществами технологии ПИВ на завершающей стадии разработки месторождения являются:

- повышение производительности скважин за счет восстановления фильтрационно-емкостных свойств пласта;

- возможность применения в скважинах с высоким уровнем обводненности;

- отсутствие рисков, связанных с разрушением цементного камня за эксплуатационной колонной и критическими негативными последствиями для обрабатываемой скважины;

- невысокая стоимость скважино-операции, приводящая к быстрой окупаемости применения данной технологии;

- экологическая безопасность (в данной технологии не применяются химические реагенты, не производится генерация отходов, требующих последующей утилизации).

[1]. Токунов В.И., Саушин А.З. Технологические жидкости и составы для повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр». – 2004. – 711 с.

[2]. Кузнецов Р.В., Шандрыгин А.Н., Шишляев В.В. Гидравлический разрыв пласта в полномасштабных гидродинамических моделях газовых месторождений // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность. Тез. докл. XI Международной научно-практической конференции. – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2023. – С. 41.

[3]. Патент РФ № 2679936. Способ очистки призабойной зоны пласта от глинистых образований / Е.А. Rogov (Россия). Заявка № 2018108337 от 06.03.2018. Опубликовано 14.02.2019. Бюл. № 22.

## **Внедрение технологий нелинейной волновой механики в нефтепереработку - путь к модернизации производств НПЗ и НПХ.**

*Сайфуллин И.Ш.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
(E-mail ins17@yandex.ru).

Научным центром нелинейной волновой механики и технологии ИМАШ РАН (НИЦ НВМТ ИМАШ РАН) создано новое направление механики - нелинейная волновая механика многофазных систем, являющаяся научной базой волновых технологий. Это направление механики базируется на ряд запатентованных нелинейных резонансных явлений и эффектов: мощного резонансного перемешивания многофазных сред при весьма малых энергозатратах (на смешение 1л. маловязкой среды затрачивается порядка 0,15 Вт/ч энергии); мощных фильтрационных потоков в капиллярах пористой среды (волновые силы в сжимаемой жидкости в  $10\text{-}10^2$  раз превышают силы радиационного давления, скорости пропитки и фильтрации возрастают в  $10\text{-}1000$  раз); управляемого тонкого и сверхтонкого измельчения и диспергирования эмульсий и суспензий (от мкм до нм); управляемой турбулизации потоков; управляемой ламинаризации потоков; сверхмощных направленных потоков и управляемых кавитационно-волновых процессов [1-4].

Прикладные результаты нелинейной волновой механики сегодня становятся основой для формирования нового направления в машиностроении - волнового машиностроения. Разработаны и испытаны уникальные волновые устройства – генераторы волн и колебаний, которые могут стать ключевыми элементами производства эффективных абсорберов, адсорберов, сепараторов, классификаторов, мешалок, смесителей, диспергаторов. Накапливается ценный опыт изготовления таких аппаратов и устройств.

Испытания созданных устройств показала возможность использования для интенсификации процесса обессоливания нефти, получения качественных масел с присадками, получения высоко стойких и тонкодисперсных (с каплями воды 1-3 мкм) стабильных водотопливных эмульсий и смазочно-охлаждающих жидкостей, совершенствования процессов дегазации и обезвоживания нефти, стабилизации нежелательных волновых процессов (гидроудары, вибрации колебания) в трубопроводных системах и повышения их надежности. Например, испытания волновых аппаратов и устройств, проведенные на предприятиях нефтепереработки в ПАО «Татнефть» подтвердили, перспективность использования волновой техники для снижения динамической вязкости нефти; изготовления стабильной микроэмульсии катализаторов; интенсификации процессов измельчения кокса; ускорения процессов гидролиза растительного сырья (при производстве биоэтанола); получения модифицированных крахмалов; получения смешанных видов топлива; перемешивания химической продукции, а также изготовления модифицированных битумов, стеклонаполненных прессматериалов и товарных моторных масел.

С учетом качественно более высокой энергоэффективности волновых аппаратов в сравнении с традиционными, формирующееся в России волновое машиностроение имеет все шансы быть востребованным для решения насущных задач модернизации НПЗ и НПХ.

[1] Ганиев Р.Ф. Украинский Л.Е. Динамика частиц при воздействии вибраций. — Киев: Наукова думка, 1975.

[2] Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии. (Введение в волновую технологию). -М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2008

[3]. Ганиев Р.Ф. Кормилицын В.И., Украинский Л.Е. Волновая технология приготовления альтернативных видов топлив и эффективность их сжигания. — М: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2008.

[4]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2008, - 712с.

[5] Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973, — 216 с.

[6]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий – Изд. 2-е,

доп. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2011, - 780с.

[7] Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2013, - 592с

# Волновые стохастические процессы городского трафика и методы эффективного управления ими с учетом требований безопасности

Соловьев А.А., Валуев А.М.

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

valuev.online@gmail.com

ложная пространственно-временная структура автотранспортных потоков, особенно в городских условиях, — факт, установленный как эмпирически, так и теоретически [1, 2]. В городской дорожной сети (ГДС) на ограниченном протяжении улицы, измеряемом часто сотнями метров и содержащем въезды (выезды), из транспортного потока выходят и, наоборот, в него вливаются автомобили, в том числе из внутриквартальных дорог, парковочных сооружений при комплексах социального назначения. Основную роль в формировании пространственно-временной структуры городских потоков играет светофорное регулирование на перекрестках и пешеходных переходах. Это придает потоку транспортных средств (ТС) волнообразный характер, разбивая его на отдельные группы ТС (кластеры).

Характерны следующие случаи: чередование на дороге участков, занятых кластерами, и пустых участков (возникающих, в частности, при пешеходных переходах); чередование участков, занятых кластерами, имеющих разную плотность в силу того, что перекресток в начале дороги на разных фазах светофорного цикла проезжают автомобили по направлениям, различающимся по интенсивности движения. В условиях плотного и медленного трафика кластеры сливаются, но цикличность потока сохраняется.

Вследствие неоднородности транспортного потока, состоящего из ТС разных типов, и вариативности вождения количество ТС в однотипных кластерах и их динамика испытывают случайные колебания. Для эффективного и безопасного использования ГДС участниками дорожного движения эти особенности транспортных потоков имеют наибольшее практическое значение для проезда регулируемых перекрестков. Перекрестки, в свою очередь, играют основную роль в обеспечении всех востребованных транспортных корреспонденций. Сочетание циклической динамики и флуктуаций (особенно при несоответствии между продолжительностями светофорного цикла на перекрестке и циклами ближайших светофоров на входных дорогах) приводит для фиксированного цикла управления на перекрестке к пульсации входных очередей перед стоп-линиями и значительным задержкам для части автомобилей. Длина очереди может случайным образом выходить за приемлемые границы, тем самым затрудняя или даже временно исключая проезд по некоторым маршрутам.

Одним из способов преодоления указанных негативных явлений является регулирование, адаптирующееся к текущей локальной транспортной обстановке, определяемой на фазах предыдущего светофорного цикла. Главным условием применимости такого способа управления трафиком является постоянный мониторинг с обработкой данных в реальном времени. Это может обеспечиваться современными техническими средствами, в том числе индукционными датчиками, радарными и видеоканерами, совместно с программными средствами оперативной обработки поступающей информации [3]. При адаптивном регулировании для каждого цикла выполняется перераспределение продолжительности фаз от фаз с меньшим значением контролируемого показателя к фазам с большим значением. Основными событиями, моменты которых устанавливаются и могут быть использованы, являются достижение выделенных локаций — стоп-линий и конфликтных точек пересечения и слияния направлений движения на перекрестке — каждым подъезжающим и проезжающим ТС. Это позволяет определять длины очередей (количество ТС) на полосах перед стоп-линиями в любой момент времени и время ожидания каждого ТС от достижения входа до начала проезда перекрестка.

Обоснование варианта метода адаптивного регулирования и его параметров осуществимо только путем вычислительных экспериментов на основе реальных характеристик потока. В расчетах установленная интенсивность и структура потока используется совместно с вероятностными распределениями временных интервалов между последовательными ТС в кластерах; последние определяются не текущей транспортной ситуацией, а составом потока и геометрией маршрутов проезда перекрестка. Параметром распределений для кластеров на дороге без пересечений является локальная плотность потока, а при проезде перекрестка — порядковый номер ТС в кластере, что подтверждено эмпирически [4].

Разработана методология таких вычислительных экспериментов в развитие работы [5], опробованная на примере Т-образного перекрестка. Первые результаты ее применения показывают, что адаптивное регулирование приводит к выравниванию длин очередей и уменьшению максимальной задержки по направлениям по сравнению с фиксированным регулированием, особенно при выборе в качестве целевых показателей суммарной длины очередей по направлениям каждой фазы.

Данные и расчеты, которые применяются для обоснования выбора метода адаптивного регулирования, могут быть использованы и для выбора управления на структурном уровне, согласно общей концепции структурно-параметрического управления дорожным движением [6].

[1]. Кленов С.Л. Стохастические математические модели транспортного потока в рамках теории трех фаз: дис... д.ф.-м.н. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2019. 269 с.

[2]. Kaufmann S. et al. Aerial observations of moving synchronized flow patterns in over-saturated city traffic. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2018. Vol. 86, p. 393-406.

[3]. Чебыкин И.А. Автоматизация мониторинга дорожного движения с помощью компьютерного зрения. *Мир транспорта*, 2020. Т. 18, № 6 (91), с. 74-87.

[4]. MnDOT Traffic Signal Timing and Coordination Manual. Minnesota Department of Transportation, 2017. 297 p.

[5]. Solovyev A.A., Valuev A.M. Organization of Traffic Flows Simulation Aimed at Establishment of Integral Characteristics of Their Dynamics // *Advances in Systems Science and Applications*, 2018. Vol. 18, N. 2, p. 1-10.

[6] Solovyev A.A., Valuev A.M. Combined Intelligent Control of a Signalized Intersection of Multilane Urban Highways. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1126, p. 471-480.

## Обзор результатов исследований и внедренных технических решений по снижению шума в газовой промышленности

*Терехов А.Л.*

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Моск. обл., пос. Развилка.

Одним из основных вредных факторов на предприятиях газовой промышленности являются высокие уровни шума во всех бизнес-сегментах отрасли. Исследования по снижению уровней шума на рабочих местах и в рабочих зонах предприятий ПАО «Газпром» проводились с 1975 года. Были определены основные источники шума на объектах добычи, подготовки, транспорта и переработки природного газа и составлены каталоги шумовых характеристик для проведения акустических расчетов. На основании результатов исследования спадов звукового давления с расстоянием от источников шума при различном рельефе местности и разнообразном подстилающем слое земной поверхности (снег различной толщины, травяной покров, зеленые насаждения, голая поверхность) разработаны поправочные коэффициенты для уточнения ожидаемых уровней шума в рабочих зонах, а также на близлежащей селитебной территории [1-3].

После проведения акустического обследования основных источников шума на объектах газовой отрасли, теория генерации шума была актуализирована и уточнена, на основании которой разработаны рекомендации по созданию малозумного оборудования. Была подготовлена и внедрена система контроля за шумовыми характеристиками оборудования при его приемке в эксплуатацию от заводоизготовителей.

Особую актуальность проблема защиты от шума приобрела при строительстве новых газопроводов по территории России от мощных Северных месторождений дополнительно к ранее существовавшим, при этом возникла необходимость размещения нескольких компрессорных цехов на одной производственной площадке. По известным зависимостям ожидалось значительные уровни шума на территории предприятий, однако реально были отмечены меньшие уровни шума [1].

Освоение месторождений на шельфе Северных морей обусловило необходимость создания новых звукоизолирующих и звукопоглощающих конструкций. Для защиты от шума открытых участков трубопроводов совместно с фирмой «К-Флекс» внедрены трудно сгораемые конструкции на основе эластомеров, которые обеспечивают снижение шума до уровня санитарных норм в зоне обслуживания и защиту от атмосферной коррозии. Дальнейшие исследования по повышению защитных свойств и акустической эффективности конструкций в настоящее время проводятся только на основе отечественных материалов [4,5].

В докладе описан комплекс мероприятий по защите от шума при создании новой техники для газовой промышленности, при проектировании, строительстве новых предприятий, а также при ремонте и реконструкции старых объектов в условиях их эксплуатации. Разработанный ООО «Газпром ВНИИГАЗ» комплекс мероприятий позволяет обеспечить создание здоровых и безопасных по шуму условий труда на объектах отрасли [6].

Совместно с институтом Машиноведения РАН начаты исследования по использованию звуковых сигналов для шумовой диагностики, шумометрии скважин, применению волновых процессов для улучшения свойств материалов [7].

Ссылки на использованные источники

[1]. Терехов А.Л., Дробаха М.Н. Современные методы снижения шума ГПА/ Под ред. Р.О. Самсонова. СПб.: 2008, 368 с.

[2]. Минаев Д.А. Повышение промышленной безопасности на компрессорных станциях магистральных газопроводов // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 6. – С. 17-21.

[3]. Терехов А.Л., Минаев Д.А. Определение влияния режима работы центробежных нагнетателей на интенсивность шумоизлучения // Вести газовой науки. Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2009. – С. 162-167.

[4]. Вольнец И.Г., Терехов А.Л., Сидорина А.В. Защита от шума открытых участков газопроводов акустическими конструкциями на основе эластомерных материалов. Газовая промышленность №2, 2021, с.108-116.

[5]. Терехов А.Л., Терехов И.И., Семенцев А.М. Повышение безопасности труда и долголетия персонала при работе в экстремальных условиях Крайнего Севера. Разработка месторождений и транспортировка природного газа. Вести газовой науки, №2, 2022, с.229-242.

[6]. Терехов А.Л., Семенцев А.М. Контроль состояния рабочих мест как инструмент повышения безопасности труда на объектах ПАО «Газпром». Газовая промышленность, №1, 2023, с 110-116.

[7]. Терехов А.Л., Маянц Ю.А., Пищухин В.М. Методологические основы шумовой диагностики технологического оборудования нефтегазовой отрасли. Газовая промышленность, №5, 2020, с.92-94.

## Способ плазменного напыления композитных покрытий

Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю.

Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия;  
trifonov\_gi@mail.ru

Разработанный способ плазменного напыления [1] относится к категории технологий газотермического нанесения покрытий, а именно к плазменным способам напыления функциональных покрытий на поверхности деталей машин. Отсюда следует, что он может быть использован в машиностроении, металлургии, энергетике, авиации, судостроении, оборонной промышленности и других сферах производства.

Суть способа состоит в том, что в процессе напыления покрытия в заданный период времени через плазмотрон подают дополнительный плазмообразующий газ, и после прекращения подачи порошка производят плазменное оплавление нанесенного покрытия, в ходе которого плазмотрон задерживают на участке покрытия, которое нагревают до расплавления, фиксируют момент расплавления и после чего плазмотрон перемещают на другой участок покрытия.

Напыление производят порошкообразным материалом, состоящим из 23 % от массовой доли материала – самофлюсующейся порошок ПР-Н70Х17С4Р4 с размером фракций 40–64 мкм, 73 % от массовой доли материала – твердый сплав ПР-ФБЮ1–4 размером фракций 40-100 мкм и 4 % от массовой доли материала – порошок алюминия размером фракций 30-40 мкм.

Технологические режимы напыления: сила тока дуги плазмотрона – 170...175 А, напряжение – 165...170 В, расход плазмообразующих газов – 2,5...2,7 м<sup>3</sup>/ч при давлении 0,2 МПа, расход напыляемого порошка – 10 г/с; дистанция напыления – 140...160 мм; скорость перемещения плазмотрона – 40 см/мин.

Технологические режимы плазменного оплавления: ток дуги плазмотрона – 190...200 А, расход плазмообразующего газа – 2,5...2,7 м<sup>3</sup>/ч при давлении 0,2 МПа; дистанция оплавления – 40...60 мм, скорость перемещения плазмотрона – 15... 18 см/мин.

Так, процесс плазменного напыления с подачей дополнительного плазмообразующего газа и последующим оплавлением нанесенного покрытия обеспечивает мобильная плазменная установка для нанесения износостойких покрытий на базе автомобиля КамАЗ [2], состоящая из: блока питания, оснащенным микроконтроллером на базе микропроцессора МК51GB-2; плазмотрона; дозаторов в виде двух питателей лопастного типа; системы охлаждения плазмотрона, состоящей из бака для охлаждающей жидкости (тосол А 40), насоса для перекачки охлаждающей жидкости, радиатора охлаждения, фильтров очистки охлаждающей жидкости, соединительных рукавов; пульта управления, включающего в себя модуль газозлектрического плазмообразующего газа, модуль газозлектрического транспортирующего газа, модуль датчиков программы изменения производительности питателей, модули электроприводов и поджига дуги, модуль подачи углеводородов и коллекторный модуль; компрессора и радиатора.

Подача дополнительного плазмообразующего газа, в частности горячих углеводородов, реализуется от двигателя внутреннего сгорания автомобиля до плазмотрона за счет применения узлов соединения, описанных в работе [3].

Нанесение покрытия до заданной толщины производили послойно. Толщина слоя, наносимого за один проход, не превышала 0,2 мм [3]. Общая температура детали при напылении – не более 200 °С [4]. При появлении на поверхности покрытия характерных цветов побежалости напыление прекращалось. В случае образования на покрытии каплевидных напылов, инородных точечных включений (выбросы из плазмотрона) напыление покрытия прекращается.

Плазмотрон задерживали на небольшом участке покрытия, которое нагревалось до расплавления (момент расплавления фиксировался инженером-технологом по появлению блестящей зеркальной поверхности, в которой начинает отражаться плазменная струя плазмотрона), после чего плазмотрон быстро перемещали на соседний участок.

Так, при плазменном напылении с последующим оплавлением структура оплавленного покрытия становится однородной, мелкодисперсной и приближается к структуре исходного порошка. В плазменном покрытии распределение по нему элементов происходит равномерно, а при оплавлении покрытия наблюдается перераспределение элементов. Выполненный сравнительный химический анализ исходной порошковой смеси с результатами химического анализа оплавленного покрытия показал, что химический состав изменяется незначительно за исключением алюминия, который как сильный раскислитель выгорал до 45%.

[1] Патент RU МПК С23С 4/134, С23С 4/08, С23С24/04, С23С30/00 № 2803172 от 07.09.2023 г. Бюл. №25.

[2] Карцев С.В. Мобильная плазменная установка для нанесения износостойких покрытий / С.В. Карцев, И.Н. Кравченко, В.Ю. Гладков, С.М. Зубачев // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. СПб: СПбГПУ, 2004. – С. 215-220.

[3] Патент RU № 66341. №2007113492/22; заявл. 11.04.2007; опубл. 10.09.2007. – Бюл. № 25.

[4] Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Машиностроение, 1993. – 488 с.

## Способ получения композиционного материала для напыления заданной фракции

<sup>1</sup>Трифонов Г.И., <sup>2</sup>Кравченко И.Н.

<sup>1</sup>Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия (trifonov\_gi@mail.ru);

<sup>2</sup>Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Рассматривая критерии получения функциональных покрытий, необходимо отметить, что их качество напрямую зависит от гранулометрической однородности применяемых порошковых смесей, поскольку температура и скорость наносимых порошковых частиц зависят от их размера [1]. Возникает задача по получению качественных композиционных порошков с задаваемым технологом фракционным размером частиц. Ввиду того, что в производственных масштабах происходит закупка преимущественно разноразмерных порошков, то указанная задача становится приоритетной и актуальной.

Существует множество технологических способов по получению композиционных порошков для напыления [2]. Выделяют механические (дробление, размол, распыление газом, распыление водой под давлением) и физико-химические методы (восстановление газом, металлотермическое восстановление, электролиз и т.д.). Однако, наиболее широкое распространения и применение получил метод распыления сжатым воздухом.

Так, в ходе проводимых исследований был разработан прибор по получению порошков одной фракции [3]. Композиционный порошок загружают в сепаратор, который последовательно соединен посредством патрубков с другими сепараторами, и подают газ. В каждом сепараторе накапливаются частицы, размер которых связан со скоростью газа и задаваемого давления в предыдущем и самом баллоне. Когда все частицы порошка распределяются по сепараторам, газ выключают и выгружают выделенные фракции. Производят измерение объема каждой полученной фракции и оценивают соотношение фракций в составе порошка.

При этом диаметры сепараторов, будут соответствовать гранулометрической однородности при условии, что в  $i$ -м сепараторе практически нет частиц, радиус которых меньше  $\tau_{min}$  и частиц композиционного порошка, радиус которых больше  $\tau_{max}$ .

$$\frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{min}} = \frac{D_i - D_{i-1}}{D_{i-1}}, \quad (1)$$

где  $D_i$  и  $D_{i-1}$  – диаметры сепараторов экспериментального устройства, м.

Однако, в процессе разделения разноразмерного композиционного порошка газовым потоком возникают нестабильные флуктуационные возрастания давления при осуществлении сепарации, т.е. увеличивается скорость входящего газа в сепаратор, что вызывает частиц размером больше расчетного. Так, показатель гранулометрической однородности  $\mu_i$ , определяется с учётом флуктуаций давления [4]. При этом релаксация флуктуации газового потока находится

$$\varepsilon(I) = Ae^{-K_1 t} + Be^{-K_2 t}, \quad (2)$$

где  $w(I)$  – отношение величины флуктуации потока в момент времени  $t$  к величине флуктуации в начальный момент;  $A$ ,  $B$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  – константы, зависящие от начальных условий и параметров экспериментальной установки.

Предварительные испытания показали, что флуктуационное возрастание давления составляет 20 %, то смещение размера частиц от расчетного при отсутствии стабилизатора потока составит около 10%, а при стабилизаторе с параметрами  $n_v = 1$  (отношение объема рабочей части сепаратора к объёму демпферной части),  $n_k = 500$  (отношение аэродинамического сопротивления соединения сепаратора с последующим к сопротивлению перфорированной трубки) это смещение не превысит 2–3%.

Таким образом, разработанный способ получения композиционного материала для напыления заданной фракции, обеспечивает повышение эффективности процесса разделения разноразмерных порошковых материалов на заданные фракции газовым потоком за счет повышения точности получения необходимых фракций и снижения степени флуктуационных возрастаний давления газового потока при осуществлении сепарации.

[1] Тамаркин М.А. Современное состояние и перспективы развития методов обработки в гранулированных рабочих средах / М.А. Тамаркин, Тищенко Э.Э. // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 9. С. 12-20.

[2] Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. [и др.]. Газотермическое напыление. 2-е изд. М.: Старая Басманная, 2015. 539 с.

[3] Патент RU МПК В07В 4/00 № 2802201 от 22.08.2023 г. Бюл. № 24.

[4] Власов Ю.Н., Шацкий О.Е. Особенности расчета системы подачи псевдооживленного металлического горючего в режиме заторможенного плотного слоя // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 4 (16). URL: <https://rucont.ru/efd/276361> (дата обращения: 30.08.2023).



# Исследование динамики несбалансированного ротора асинхронного двигателя при внешней периодической нагрузке

Украинский Л.Е., Добненко М.С., Панин С.С.

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

## Цель

Работа посвящена исследованию реакции несбалансированного ротора асинхронного двигателя, установленного на подпружиненную платформу.

## Введение

В качестве исследуемого объекта выбрана система с одной поступательной и одной вращательной степенью свободы «рис. 1».

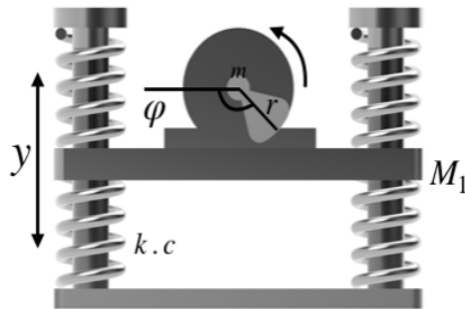


Рис1. Расчетная схема установки

Динамика такой системы с учетом общепринятых допущений [1, 2] описывается системой уравнений 1:

$$\begin{cases} (M_1 + m)\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -mr[\ddot{\varphi}\sin\varphi + \dot{\varphi}^2\cos\varphi] \\ J\ddot{\varphi} + \mu\dot{\varphi} = K_m[\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha] - mr[\dot{y}\sin\varphi + g\sin\varphi] \\ L_e \frac{di_\alpha}{dt} = U_\alpha - R_e i_\alpha + K_r A_r \psi_\alpha + K_r z_p \varphi \psi_\beta \\ L_e \frac{di_\beta}{dt} = U_\beta - R_e i_\beta + K_r A_r \psi_\beta - K_r z_p \varphi \psi_\alpha \\ \frac{d\psi_\alpha}{dt} = R_r K_r i_\alpha - A_r \psi_\alpha - z_p \varphi \psi_\beta \\ \frac{d\psi_\beta}{dt} = R_r K_r i_\beta - A_r \psi_\beta + z_p \varphi \psi_\alpha \end{cases} \quad (1).$$

Данная система описывает как процессы происходящие в механической части установки, так и электромагнитные процессы в асинхронном двигателе. Уравнения асинхронного двигателя записаны в  $\alpha\beta$ -координатной системе, получаемой с помощью преобразования Кларк. В соответствии с этим преобразованием, исходная трехфазная система напряжений  $U_a, U_b, U_c$  связана с  $\alpha\beta$  следующим соотношением:  $U_\alpha = U_a, U_\beta = \frac{U_a + 2U_b}{\sqrt{3}}$ .

## Моделирование и результаты

Численно интегрируя систему уравнений 1, при начальных условиях таких, что достигается механический резонанс, рассмотрим динамику изменения скорости ротора при изменении задающей частоты. При соблюдении определенных условий, о которых будет сказано далее, можно наблюдать «захват» скорости вращения ротора в некотором диапазоне частот выше резонансной, и при дальнейшем повышении частоты наблюдается срыв «рис 2».

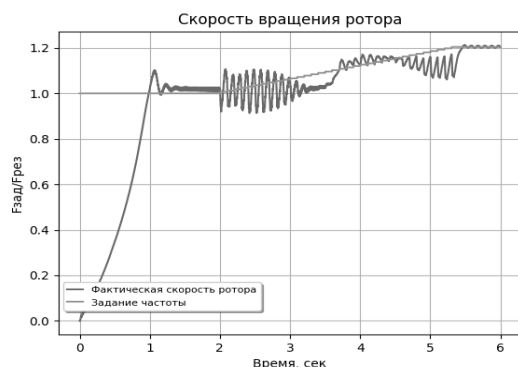


Рис.2. Эффект захвата скорости ротора

Подобное поведение наблюдается при определенной совокупности факторов и начальных условий, таких как мощность двигателя, физические характеристики установки, а также немаловажным является скорость изменения частоты  $\frac{d\omega}{dt}$ . Влияние этой величины очевидно, т.к при изменении частоты неизбежны переходные процессы в двигателе, и при достаточно малых изменениях частоты на промежутке времени, превышающим время переходного процесса, такой эффект может не наблюдаться.

[1]. Шестаков В.М. Динамика автоматизированных электромеханических систем вибрационных установок / В.М. Шестаков, А.Е. Епишкин. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2005.

[2]. Токарев Б. Ф. Электрические машины. / М.: Энергоатомиздат, 1990.

## Анализ результатов исследований процессов волнового и струйного способов кольматации

Украинский Л.Е., Шамов Н. А., Устенко И.Г.

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

E-mail: shamov.na@mail.ru

Многие виды кольматации при бурении скважин предупреждают нефтегазовые проявления, поглощения буровых и цементных растворов, улучшают их реологические характеристики, способствуют повышению качества цементирования скважин. Наиболее широкое распространение в нефтегазовой отрасли получили два вида репрессивной кольматации: волновой кавитационно-вихревой, созданный на основе теории и практики нелинейной волновой механики многофазных сред [1–3], и гидродинамический струйный [4].

### Цель экспериментальных исследований

По результатам исследований определить, какой из двух указанных выше способов кольматации имеет преимущество и на основании полученных данных разработать более эффективные виды техники и технологии кольматации для применения в строительстве скважин.

### Исследуемые параметры, показатели, характеристики

Объемная концентрация твердой фазы кольматационного раствора

$$C_k = \frac{V_g}{V_w + V_g} \times 100\% ,$$

где  $V_g$  – объем твердой фазы раствора;  $V_w$  – объем дисперсионной фазы.

Интенсивность расходуемой на кольматацию энергии

$$I = \frac{\Delta P_n Q}{S_k} ,$$

где  $\Delta P_n$  – равные перепады давления на волновом излучателе и гидродинамической насадке;  $Q$  – равные расходы растворов через них;  $S_k$  – эффективная площадь пятна контакта с проницаемой породой, она существенно больше у волнового излучателя из-за его конструктивных особенностей, чем у гидродинамической струи.

$V_f$  – объем фильтрата кольматационного раствора, выделившийся через образец породы за время проведения его кольматации.

Степень эффективности кольматации исследуемого образца искусственной породы

$$\Psi_k = \frac{k_0 - k_k}{k_0} \times 100\% ,$$

где  $k_0, k_k$  – соответственно исходная и конечная проницаемости после кольматации.

Показатель седиментации растворов (седиментационной устойчивости)

$$S_c = \frac{V_0 - V_p}{V_0} \times 100\% ,$$

где  $V_0$  – общий объем налитого в мерный сосуд раствора;

$V_p$  – объем раствора ниже уровня расслаивания.

### Проведение исследований

В качестве кольматационной среды использовались растворы куганакской глины различной плотности с низкими гидрофильными свойствами, но близкие к глинам разбурываемых пропластков скважин.

Наблюдения подтвердили, что растворы куганакской глины после 6-часовой волновой кавитационно-вихревой обработки (ВКВО) имеют более высокую устойчивость к седиментации твердой фазы бурового раствора, чем после применения гидродинамической струйной (ГДСО) (табл. 1).

Таблица 1. Изменение параметров седиментации  
глинистых растворов в зависимости от их плотности

Плотность раствора, кг/м <sup>3</sup>	После ВКВО		После ГДСО	
	$t_{cv}$ , час.	$S_{cv}$ , %	$t_{cs}$ , час.	$S_{cs}$ , %
1020	6	33	0.5	77
1070	24	11	3	42
1130	480	0.2	6	19

Процессы седиментации твердой фазы растворов после ВКВО существенно замедлились по сравнению с

ГДСО, а показатели седиментации значительно снизились, что свидетельствует о более высокой седиментационной устойчивости. При этом раствор плотностью  $1130 \text{ кг/м}^3$  после кавитационно-вихревого диспергирования твердой фазы принял вид пастообразной массы, которая не изменяла своего состояния длительное время, но обладала высокой текучестью и относительно низкой вязкостью.

Результаты исследований подвергнутых волновой обработке и гидромеханическому перемешиванию раствора куганакской глины плотностью  $1070 \text{ кг/м}^3$  приведены в табл. 2. В результате ВКВО доля частиц в растворе 4–6 мкм составляла 50%, 40–70 мкм – 50% от общего числа частиц. В то время как после ГДСО она составляла соответственно 40% и 50%.

Таблица 2. Определение размеров частиц твердой фазы раствора после струйной и волновой обработок

Выходной параметр	Вид обработки раствора	Диаметр частиц твердой фазы, мкм				
		≤ 4	4–6	6–12	12–40	40–70
Доля частиц, %	ГДСО	8	32	16	4	40
	ВКВО	8	42	18	18	14

На рис. 1–3 представлены графики некоторых зависимостей величины давления начала фильтрации от объемной концентрации твердой фазы, статического перепада давления на образце породы, его исходной проницаемости, интенсивности расходуемой энергии при фиксированных значениях таких факторов, как  $C_k = 7,8\%$ ,  $k_0 = 0,2 \text{ мкм}^2$ ,  $\Delta P_n = 0,8 \text{ МПа}$ ,  $I = 8 \text{ МВт/м}^2$  при волновой кольматации;  $C_k = 7,8\%$ ,  $k_0 = 0,2 \text{ мкм}^2$ ,  $\Delta P_n = 0,8 \text{ МПа}$ ,  $I = 280 \text{ МВт/м}^2$  при струйной кольматации (при равной гидравлической энергии).

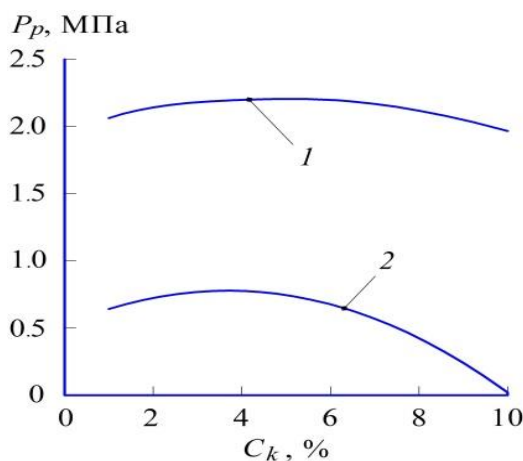


Рис. 1. Влияние объемной концентрации кольматанта на величину давления начала фильтрации:

$$1 - P_p = 1.95 + 0.13C_k - 0.017C_k^2 \text{ после волновой кольматации;}$$

$$2 - P_p = 0.52 + 0.14C_k - 0.019C_k^2 \text{ после струйной кольматации.}$$

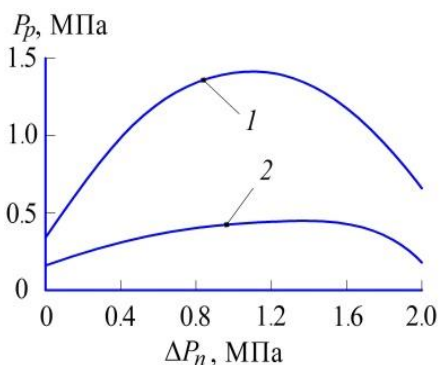


Рис. 2. Влияние перепада давления на образце породы на величину давления начала фильтрации:

$$1 - P_p = 0.34 + 1.98\Delta P_n - 0.91\Delta P_n^2 \text{ после волновой кольматации;}$$

$$2 - P_p = 0.16 + 0.44\Delta P_n - 0.17\Delta P_n^2 \text{ после струйной кольматации}$$

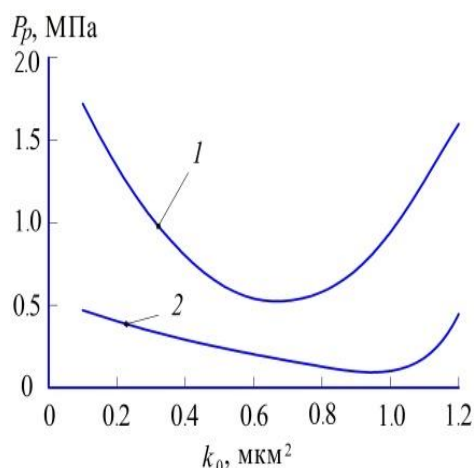


Рис. 3. Влияние исходной проницаемости породы на величину давления начала фильтрации:

$$1 - P_p = 2.18 - 4.93k_0 + 3.66k_0^2 \text{ после волновой кольматации};$$

$$2 - P_p = 0.54 - 0.75k_0 + 0.31k_0^2 \text{ после струйной кольматации}$$

Также проводились исследования с целью установления факта образования в образцах проницаемой породы слоя кольматации при отсутствии перепада давления, т.е. репрессии на них. Степень кольматации при ВКВО была иногда довольно заметной (от 22 до 99%), то есть частицы кольматанта перемещались в поровых каналах породы и образовывали в них кольматационные пробки. Такое перемещение частиц можно объяснить нелинейными волновыми процессами, проходящими вблизи поверхности образца породы и в его каналах. Процесс кольматации при ГДСО был намного слабее.

#### Выводы и рекомендации

Из приведенных в табл. 1 и 2 результатов, на рис. 1–4 зависимостей, построенных на основе математических моделей, полученных при обработке экспериментальных данных следует, что волновая кольматация заметно эффективнее струйной.

Даже при отсутствии репрессии на образцах породы вследствие нелинейных волновых процессов происходит перемещение частиц глины в поровые каналы породы и образование в них пробок кольматанта.

Установлено, что использование в технологиях приготовления буровых растворов и проведения кольматации кавитационно-волнового диспергирования твердой фазы глинистых пластов повысит седиментационную устойчивость растворов, улучшит их антифрикционные свойства [5], создаст более прочный к колебаниям давления слой кольматации в породах скважин.

[1]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, дополн. М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2011. 780 с.

[2]. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (Введение в волновую технологию). М.: R&C Dynamics. 2008. 192 с.

[3]. Ganiev R.F., Ganiev S.R., Kasilov V.P., Pustovgar A.P. Wave technology in mechanical engineering. Co-published by John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC Salem Massachusetts, USA. Published simultaneously in Canada. 2015. 156 p.

[4]. Мавлютов М.Р., Кузнецов Ю.С., Поляков В.Н. Управляемая кольматация призабойной зоны пластов при бурении и заканчивании скважин // НТЖ «Нефтяное хозяйство». 1984. № 6, с. 7-10.

[5]. Маслов В.В., Коновалов Е.А., Плаксин Р.В. Исследование кавитационной технологии приготовления буровых технологических жидкостей // НТЖ «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». 2006. № 6, с. 38-42.

## Пространственные колебания изогнутого трубопровода

*Утяшев И.М., Шакирьянов М.М.*

Институт механики УФИЦ РАН, УФА, Россия.

Трубопроводы являются распространенными и ответственными элементами в машинах и аппаратах, в оборудовании энергетики, нефтехимии, в ракетно-космической технике и т.д. Поэтому изучение их эксплуатационных характеристик является всегда актуальным. В частности, возбуждение в трубопроводных системах пространственных колебаний и установление их закономерностей представляет практический интерес.

Рассматриваются пространственные колебания изогнутого двухопорного трубопровода с заключенной в нем жидкостью при поступательных вибрационных движениях основания. Трубопровод крепится к опорам с помощью сферических шарниров. Одна из опор неподвижна относительно основания, другая, имеющая продольные упругие элементы крепления, может скользить по нему. Колебания основания происходят в горизонтальном направлении с равными амплитудами, частотами и фазами. Учитываются взаимодействия внутреннего постоянного давления и изменений кривизны осевой линии, продольной и окружной деформаций трубы [1].

Деформации трубы, связанные с выходом ее оси из плоскости изгиба, предполагаются малыми (отсутствует деформация кручения). Поэтому в основе исследования лежит модель изгибно-вращательных движений трубопровода [2]. Согласно этой модели, пространственные движения трубы рассматриваются как совокупность относительных изгибных колебаний в одной плоскости, переносных вращений этой плоскости вокруг прямой, проходящей через опоры, и переносных поступательных перемещений подвижного основания. В результате принятия данной модели пространственные колебания трубы описываются системой двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно угловых и изгибных перемещений. Функция прогиба трубопровода, удовлетворяющая шарнирным креплениям на опорах, аппроксимируется по первой основной форме. Подстановка аппроксимирующей функции в указанную выше систему и применение во втором ее уравнении метода Бубнова-Галеркина приводит к задаче Коши, которая далее решается численно методом Рунге-Кутты. Также изучен случай малых изгибных и угловых движений трубы, для которого получено аналитическое решение задачи. Числовые расчеты были проведены для стальной, титановой и композитной труб с равными длинами, внутренними радиусами и толщинами стенок. Для сравнительного анализа результатов вычислений для всех труб были построены графические зависимости угловых и изгибных перемещений от времени, их фазовые траектории, картины Пуанкаре и спектры частот. В изученном случае малых изгибно-вращательных движений построены графические зависимости частот изгибных и угловых колебаний труб от безразмерного параметра внутреннего давления. Показано, что с увеличением данного параметра собственные частоты изгибных колебаний труб уменьшаются, достигают минимальных значений, а далее, ввиду преобладания сил продольного натяжения над действиями сил веса и внутреннего давления, увеличиваются. При этом частоты угловых колебаний труб сначала растут, достигают своего максимума, а затем уменьшаются. Кроме того, установлено, что с увеличением внутреннего давления в трубах графические зависимости как изгибных, так и угловых перемещений от времени, полученные приближенным аналитическим и численным решениями, сближаются. Сравнительный анализ результатов вычислений по формулам приближенного аналитического решения и численного моделирования позволил установить, что при относительно небольших амплитудах перемещений опор труб их вращательные перемещения складываются из колебаний с двумя частотами, а изгибные перемещения – с пятью разными частотами. Кроме того, можно констатировать хорошее согласие в числовых значениях собственных частот угловых и изгибных колебаний, полученных по приближенному аналитическому и численному подходам. Результатами вычислений также подтверждено, что увеличение амплитуды перемещений опор приводит к увеличению амплитуд как изгибных, так вращательных колебаний трубы. При этом также увеличиваются расхождения в значениях искомых величин, полученных приближенным аналитическим и численным методами. Показано, что при определенной совокупности входных данных и небольшом значении относительной амплитуды перемещений опор изгибно-вращательные колебания труб происходят в периодическом режиме. Десятикратное увеличение относительной амплитуды перемещения опор (при сохранении значений всех остальных входных данных) приводит к неперiodическим колебаниям труб.

[1] Ильгамов М.А. Динамика трубопровода при действии внутреннего ударного давления // Изв. РАН. МТТ. 2017. № 6. С. 83-96.

[2] Ганиев Р.Ф., Ильгамов М.А., Хакимов А.Г., Шакирьянов М.М. Пространственные колебания трубопровода в сплошной среде под действием переменного внутреннего давления // Проблемы машиностр. и надежности машин. 2016. № 6. С. 3 – 13.

# Механизм взаимодействия высокоскоростных коротких струй жидкости с жесткой преградой

## Шамов Н.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия  
E-mail: shamov.na@mail.ru

### Цель работы

Предложить гипотетические представления о явлениях, происходящих при ударном взаимодействии высокоскоростных коротких струй с преградой, обозначить возможные области их практического применения.

### Динамика взаимодействия струи жидкости с преградой

При ударе струи о жесткую непроницаемую преграду тонкие передние слои струи останавливаются, о них тормозятся следующие слои и так далее. Возникает распространяющаяся со скоростью звука  $u_s$  волна давления вдоль струи. Если допустить, что короткая струя имеет правильную геометрическую форму, которая за крайне малое время гидроудара не успевает существенно измениться, и ведет себя как упругое твердое тело, то происходящий в струе кратковременный динамический процесс близок к явлению гидроудара в трубе.

В таком случае амплитуду давления при гидроударе можно приближенно оценить по формуле Н.Е. Жуковского [1]

$$p_{0s} = \rho_s c_s u_s,$$

где  $\rho_s$  – плотность струи;  $c_s$  – скорость звука в ней;

Процесс распространения волны давления вдоль остановившейся струи  $l$  идентичен явлению отражения падающей на стенку 2 плоской волны (рис. 1), поэтому он может быть представлен как периодический с квазипрямоугольной формой изменения давления процесс (рис. 2).

Время нахождения в сжатом состоянии передних слоев струи  $t_s$  в месте контакта ее с преградой определяется временем прохождения скачка давления 3 (рис. 1) от них до конца струи и возвращения его в виде скачка разряжения [2]

$$t_s = \frac{2L_s}{c_s},$$

где  $L_s$  – длина струи.

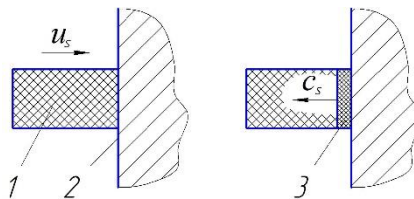


Рис. 1. Удар струи жидкости о поверхность непроницаемой преграды

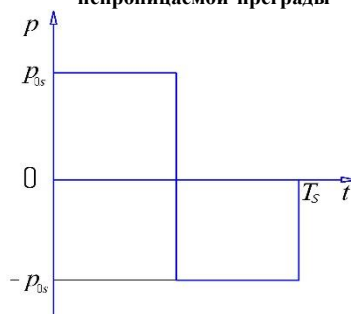


Рис. 2. Идеализированный начальный процесс изменения давления в упругой неразрывной струе при ее ударе о преграду

Вслед полуволне сжатия от стенки отражается полуволна разряжения.

Период колебания давления в струе

$$T_s = \frac{4L_s}{c_s}.$$

Функция, описывающая прямоугольной формы периодический процесс, раскладывается в ряд Фурье, и ее можно представить в виде суммы синусоидальных колебаний давления

$$p(t) = \frac{4p_{0s}}{\pi} \left( \sin \omega_n t + \frac{\sin 3\omega_n t}{3} + \frac{\sin 5\omega_n t}{5} + \dots + \frac{\sin n\omega_n t}{n} \right),$$

где  $\omega_n$  – наиболее низкая частота в системе.

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_s} = \frac{\pi c_s}{2L_s}.$$

Таким образом, при ударе струи о стенку возникает кратковременный (до конца сохранения форма струи) импульсный колебательный процесс с широким спектром частот и значений амплитуд давления.

Исходя из того, что явление гидроудара струи о преграду представляет собой падение и отражение плоской волны давления, то его можно рассматривать как процесс, протекающий по законам геометрической акустики.

Короткая струя при переходе в полупериод разряжения (рис. 3), возможно, начинает распадаться на несвязанные друг с другом фрагменты 1, разделяемые зонами кавитации 2. В центральной области струи на границе с поверхностью преграды образуется кавитационный “конус”, вследствие возникновения радиально направленных от центра разрывающих струю высокоскоростных течений.

Такие течения разрушают слои технологических отложений на поверхности преграды и очищают ее.

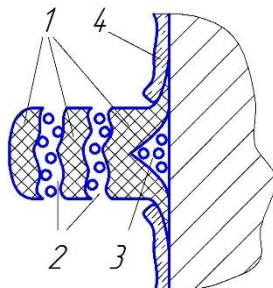


Рис. 3. Растекание и распад струи с образованием кавитационных зон и радиальных течений на поверхности преграды

При проведении пропитки или кольматации проницаемой преграды, наряду с отражением волны давления от границы преграды, происходит прохождение волны в ее скелет и гидросреду пористой проницаемой породы.

Амплитудное значение давления в отраженной волне, следующей вдоль струи можно описать следующей формулой

$$P_{0vs} = P_{0s} V_s \approx P_{0s} \sqrt{(1 - 0.33m_p) V_s^2 + 0.33m_p V_{pp}^2},$$

где  $m_p$  – пористость проницаемой преграды;  $V_s$  – коэффициент отражения волны давления в струе от скелета пористой преграды;  $V_{pp}$  – коэффициент отражения волны давления в струе от поровой гидросреды преграды.

Амплитуда давления волны, проходящей в скелет пористой преграды

$$P_{0pg} = P_{0s} W_{pg},$$

где  $W_{pg}$  – коэффициент прохождения волны давления в скелет пористой преграды.

Амплитуда давления в волне, проходящей в гидросреду порового пространства преграды

$$P_{0pp} = P_{0s} W_{pp},$$

где  $W_{pp}$  – коэффициент прохождения волны в гидросреду порового пространства преграды.

Определим скорость движения кольматационной или пропитывающей среды по поровым каналам в момент соударения струи о проницаемую преграду. Энергия взаимодействия струи со стенкой на границе их раздела распределяется следующим образом. Кинетическая энергия струи преобразуется в потенциальную энергию волны давления в поровой среде, в потенциальную энергию волны давления в скелете породы, потенциальную энергию отраженной волны и кинетическую энергию движения кольматационной среды в поровом пространстве.

Баланс плотности энергии струи составит

$$E_{ks} = E_{ps} + E_{pp} + E_{pg} + E_{kp},$$

где  $E_{ps}$  – плотность потенциальной энергии отраженной волны давления в струе;

$E_{pp}$  – плотность потенциальной энергии волны, прошедшей в поровую среду;

$E_{pg}$  – плотность потенциальной энергии волны, прошедшей в скелет пористой проницаемой преграды;

$E_{kp}$  – плотность кинетической энергии движения кольматационного или пропиточного материала по поровым каналам.

Отсюда,

$$\rho_s u_s^2 = \frac{P_{0s}^2 V_s^2}{\rho_s c_s^2} + \frac{P_{0s}^2 W_{pp}^2}{\rho_{ps} c_{ps}^2} + \frac{P_{0s}^2 W_{pg}^2}{\rho_{pg} c_{pg}^2} + \rho_s u_{sp}^2,$$

где  $u_{sp}$  – начальная средняя скорость движения кольматационной или пропиточной среды по поровым каналам.

Под действием силы сопротивления, определяемой ее коэффициентом сопротивления среды суспензии движению частицы кольматанта или пропиточного материала, зависящего от ее скорости, динамической вязкости  $\mu_s$  гидросреды струи, частица диаметром  $d_k$  и плотностью  $\rho_k$ , движущаяся со скоростью  $u_s$  начинает останавливаться. Для прямого канала в породе, ось которого совпадает с направлением движения короткой струи, условие равновесия сил запишется в виде

$$\frac{\pi d_k^3 \rho_k}{6} \times \frac{du_{sp}}{dt} = \frac{\pi d_k^2 \rho_s}{8} c_x u_{sp}^2.$$

Продолжительность движения частицы до полной остановки

$$t_k = \frac{4d_k \rho_k}{3\rho_s} \int_{u_s}^0 \frac{du_{sp}}{c_x u_{sp}^2}.$$

Для случая, когда сопротивление движению частицы описывается формулой Стокса для жестких сферических тел

$$t_k = \frac{d_k^2 \rho_k}{18\mu_s} \ln u_{sp}, \quad l_{nk} = \frac{d_k^2 \rho_k}{18\mu_s} u_{sp},$$

где  $l_{nk}$  – глубина проникновения частицы в поровое пространство преграды.

В момент удара плотные частицы твердой фазы получают за счет большей силы инерции перемещение относительно дисперсионной среды в глубину порового пространства преграды 1 (рис. 4) через ее каналы и трещины, раскрывшиеся под действием удара струи, которое на один-два порядка выше давления непрерывной струи. Таким образом, образуется зона пропитки или слой кольматации 2

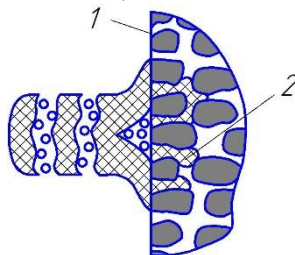


Рис. 4. Создание зоны пропитки или кольматации в поровом пространстве преграды

Все известные виды гидродинамической и волновой кольматации [3] осуществляются за счет переноса массы и энергии от кольматационного устройства через зазор между ним и стенкой скважины, заполненный буровым раствором. При этом часть расходуемой энергии теряется на преодоление сил сопротивления гидросреды скважины. Процесс кольматации будет протекать более эффективно, если удастся существенно уменьшить сопротивление среды движению к стенке скважины потока кольматационного раствора. Например, при обработке проницаемой породы короткими струями через локальную область между стенкой и кольмататором, заполненную парогазовой средой [4].

Приходилось наблюдать, как перед спуском в скважину при пробном запуске лежащего поверх загрязненных нефтяным шламом, ржавчиной и асфальто-смолистыми отложениями насосно-компрессорных труб, роторно-пульсационного генератора с турбинным приводом в течение нескольких секунд при промывке технической водой под давлением 2 – 3 МПа происходила полная очистка короткими струями участков труб.

В действительности прямоугольный профиль короткой струи, вытекающей из роторно-пульсационного генератора, будет скорее всего ромбическим у. Но результат процесса воздействия на стенку на практике не будет существенно отличаться от рассмотренного выше.

Только экспериментальные исследования с применением высокоскоростной фотосъемки дадут более точную картину процесса.

#### Выводы и предложения

Воздействие импульсными струями на твердые преграды можно использовать:

- в процессе бурения с кольматацией азрированными растворами;
- при пропитке специальными составами изделий из пористых материалов;
- для очистки сильно загрязненных поверхностей технологических емкостей.

[1]. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Полн. собр. соч., ЦАГИ. М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. Главная редакция авиационной литературы, т. 7, 1932. – С. 58-147.

[2]. Шамо́в Н.А. Взаимодействие прерывистых струй суспензии с проницаемой стенкой. Труды XXXIII Уральского семинара РАН “Механика и процессы управления”, раздел “Механика жидкости и газа”. Миасс: Изд-во Урал. отд. РАН, 2003. С. 67-71

[3]. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, дополн. М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. 780 с.

[4]. Устройство для кольматации и очистки стенки скважины: а.с. 1594264 СССР: Е21 В37/00. Заявл. 06.07.87, опубл. 1990, Бюл. № 35. 2 с.: ил.



## Реакция человека на воздействие длинноволновых инфракрасного диапазона сигналов тканых электронагревателей

Шульженко А.А., Модестов М.Б.

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

aa.shulzhenko.01@mail.ru

Целью настоящей работы является исследование возможностей тканых электронагревателей, которые способны осуществлять не только тепловое воздействие на человека в качестве нагревателей, а и при определенных тепловых параметрах способствовать приему ответных частотных сигналов, фиксируемых с помощью измерителей температур.

Основной способ нагрева ими обогреваемых объектов - контактный. Использование в качестве тепловыделяющих элементов углеродных нитей, являющихся полупроводниковыми материалами, определяет их технические характеристики, способ генерации теплового сигнала. В первую очередь, это связано с их ковалентной структурой. В подобных структурах тепловые процессы в основном определяются фонон-фононным взаимодействием [1]. Частота колебаний узлов кристаллической решетки в графите равна десяткам терагерц [2].

Человек сам генерирует тепловые сигналы. Основная спектральная плотность испускаемых человеком тепловых сигналов находится в области от 7 до 14 мкн, что соответствует частоте -20-40 ТГц [3, 4].

Таким образом, частотные диапазоны тепловых сигналов, создаваемых человеком и тканями нагревателями, идентичны и лежат в пределах длинноволнового инфракрасного диапазона

На рис. 1 показаны полученные экспериментальным путем температурного изменения в области тканого электронагревателя при воздействии на человека длинноволновых инфракрасных сигналов разных уровней 5-71.

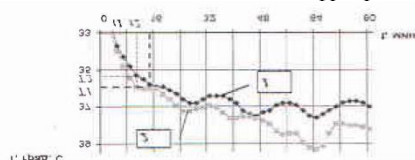


Рис. 1. Изменение температуры в области тканого электронагревателя под воздействием теплового сигнала нагревателя и обратной реакции на эти сигналы человека: 1- при уровне сигнала, вызывающем только потовыделение; 2 - при уровне сигнала, вызывающем потовыделение и другие механизмы терморегуляции.

Следует отметить, что близкий характер изменения сигналов при тепловом воздействии на тело человека был получен с использованием более сложного лазерно-доплеровского метода (рис. 2) [8].

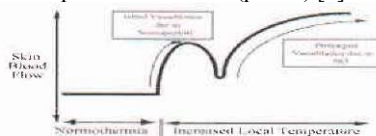


Рис. 2. Реакции на согревание: сосудорасширяющие и сосудосужающие механизмы в теле человека.

**Выводы.** Используя широкополосные, определенного уровня сигналы, длинноволнового инфракрасного диапазона, генерируемые тканым электронагревателем, возможно устойчивое получение неинвазивным способом ответной реакции человека на этот сигнал, в виде температурных изменений в области нахождения тканого электронагревателя, отражающих вазодилатацию периферического сосудистого русла, вазоконстрикцию висцеральных сосудов, потовыделение.

Получение ответной реакции от человека с помощью недорогих и простых в эксплуатации устройств, в которых применяются тканые электронагреватели, создает предпосылки для использования этого метода не только при проведении научных исследований, а и в широкой медицинской практике.

- [1] Дмитриев А С Введение в нанотеплофизику - М : ВИНОМ Лаборатория знаний, 2015 -790 с.
- [2] Анеельм А И. Введение в теорию полупроводников. - М : Мир, 1978 - 616 с
- [3] Шаракшанэ А С. Восстановление параметров меняющегося во времени пространственного температурного распределения модельных биологических объектов методом акустотермографии. Дисс. к.ф.-м.н Москва, ФГУП УН ИРЭ РАН, 2014. 149 с
- [4] Сайт: [http://lii\(ii\)U-m-1iii.v3Sg2.filinl](http://lii(ii)U-m-1iii.v3Sg2.filinl).
- [5] Шульженко А А., Модестов М.Б. Моделирование тепловых процессов в нагревательной системе М., Проблемы машиностроения и надежности машин, 2021, № 2, с. 116-124
- [6] Шульженко А А., Модестов М.Б., Модестов Б М , Шульженко Ан А Моделирование тепловых процессов при различных параметрах слоев многослойной тонкой стенки: человек - тканый электронагреватель М Вестник научно-технического развития № 1 (164), с 38-44
- [7] Шульженко А А, Модестов М Б, Модестов Б.М, Григорян А.Э . Шульженко Ан А Некоторые технологические особенности использования тканых электронагревателей при диагностике Научные труды 6-ой международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное машиноведение. ЖИВКОМ - 2022» ИМАШ РАН - 2022 , с 412-416
- [8] Kellogg J., Dean L In vh o mechanisms of cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans during thermoregulatory challenges // Journal of applied physiology 2006, vol 100, № 5, p. 1709-1718

*Секция №2*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических направлений развития прочности, живучести и безопасности машин.**

**Председатель – Матвиенко Ю.Г., д.т.н., профессор**

**Секретарь – Чернов Д.В., м.н.с.; [chernovdv@inbox.ru](mailto:chernovdv@inbox.ru)**

## Механические и трибологические свойства латунных покрытий, полученных газодинамическим напылением

Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.

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

E-mail: pugachevmax@mail.ru

Задачей исследований являлась оценка влияния на свойства, фазовый состав и структуру медно-цинкового покрытия параметров напыления и последующей термической обработки.

Результаты исследований состава покрытия после напыления с помощью рентгенофлуоресценции показал, что оно состоит из 35% цинка и 64,8% меди. По диаграмме состояния медь-цинк при таком их содержании формируется область твердых растворов цинка в меди  $\alpha$ -фаза и  $\beta'$ -фаза (CuZn), этот состав близок к двойной латуни Л65 [1].

Фазовый анализ показал, что покрытие, нанесенное при смещении сопла 2 мм, подвергается более длительному воздействию температуры, что приводит к интенсивной диффузии меди в цинк и формированию твердого раствора электронного типа на базе  $\gamma$  – фазы (Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>) с массовой долей 49%. Нанесение покрытия при смещении сопла 3 мм позволяет сформироваться твердому раствору меди в цинке  $\eta$  – фаза с массовой долей 19%.

Термическая обработка (ТО) покрытия, полученного при смещении 3 мм при температуре ниже точки плавления цинка 415°C и выдержки 180 мин, не приводит к получению структуры, близкой к двойным латуням, т.к. присутствует медь с массовой долей 3%. При смещении слоев на 2 мм и температуре ТО выше точки плавления цинка 425°C, наоборот, формируется структура на основе фаз  $\alpha$  и  $\beta'$ , что соответствует двойным латуням. Т.е. смещение слоев при напылении покрытия с температурой напыляющего воздуха 450°C на 2 мм и последующей ТО покрытия при температуре 425°C в течении 180 минут позволяет получить фазовый и химический состав соответствующий двойной латуни Л65.

Когезия исходного покрытия составила 78 МПа. ТО в течении 5 мин уменьшает эту величину до 65 МПа, что связано с появлением  $\beta'$  – фазы, снижающей прочность латуней [2]. Увеличение времени ТО до 10 минут возвращает прочность к исходному значению, что объясняется ростом массовой доли  $\alpha$  - фазы на 19% и снижением  $\beta'$  – фазы на 9%. При времени выдержки 20 минут когезия снижается до 43 МПа. Выдержка в течении 60 и более минут повышает прочность до 90 МПа, что связано с ростом массовой доли  $\alpha$  - фазы и снижением  $\beta'$ .

Результаты трибологических испытаний показывают, что после небольшого пути трения при начальной нагрузке интенсивность изнашивания резко уменьшается с  $1,58 \cdot 10^{-7}$  до нулевой отметки и дальнейшее увеличение давления сопровождается частичным переносом медно-цинкового покрытия на сопряженное контртело. Процесс переноса носит волнообразный и характеризуется во взаимном переносе материала покрытия на контртело и наоборот.

Повышение нагрузки приближает износ покрытия к нулю. Приведенные экспериментальные зависимости позволяют предположить, что в основе механизма контактного взаимодействия стали с покрытием, медь-цинк со сталью ШХ15 происходит процесс массопереноса в зоне поверхностной пластической деформации, который минимизирует уровень поверхностного разрушения, при этом износа контртела при всех нагрузках не происходит: поверхность трения полностью защищена покрытием типа латуни, образующегося в результате массопереноса в зоне контакта.

Покрытие с ТО работает по тому же механизму, однако на начальных этапах испытаний присутствует более высокая нестабильность трения, снижающаяся при увеличении нагрузки.

Шероховатость поверхности Ra при испытании повышается незначительно в пределах 0,3 или не меняется вовсе в случае образцов с ТО.

Таким образом, нанесение медно-цинкового покрытия с температурой напыляющего воздуха 450°C со смещением слоев на 2 мм и последующей ТО покрытия при температуре 425°C в течении 180 минут позволяет получить фазовый и химический состав, соответствующий двойной латуни Л63. Нанесение медно-цинкового покрытия с температурой напыляющего воздуха 450°C со смещением слоев на 2 мм и последующей ТО покрытия при температуре 425°C в течении 60 минут и более позволяет получить состав, соответствующий двойной латуни с содержанием твердых растворов цинка в меди с разной массовой долей меди. Испытания исследуемых покрытий на износ в среде индустриального масла при нагрузке до 500 Н показали эффект безызности этих покрытий.

Для определения предельной нагрузки на пару трения необходимо проведение дальнейших трибологических исследований с целью её выявления и оценки области использования медно-цинковых покрытий, полученных газодинамическим напылением в функциональных поверхностях трибосопряжений.

[1] Ефремов, Б. Н. Латуни. От фазового строения к структуре и свойствам. М: ИНФРА-М, 2020. 314 с.

[2]. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Оценка когезионной прочности газодинамических покрытий // Вестник машиностроения. 2019. № 4. С. 64-69.

## Исследование распределений локальных деформаций тепловым методом контроля

Ахметханов Р.С.

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

E-mail: mibsts@mail.ru

Цель работы показать методы, которые позволят дать количественные оценки локальному распределению деформации при нагружении деталей. С учетом неоднородности локальных распределений деформаций и напряжений определяются коэффициенты запаса прочности. Зоны с большими локальными напряжениями подвержены в первую очередь разрушениям.

Стадийный процесс усталостного разрушения связан с эволюцией структуры металла. При этом усталостное разрушение представляет собой многоуровневый и разномасштабный кинетический процесс и характеризуется обязательным прохождением стадий образования полосовых субструктур, микротрещин, формированием коротких и макротрещин. Каждая стадия данного процесса отличается своими физическими механизмами, и процесс разрушения происходит в результате взаимодействия объектов, имеющих разный масштабный уровень – от атомного до мезо- и макроскопического. Этот процесс является стохастическим.

В настоящее время считается, что размер структурных элементов деформируемого тела определяет размеры зон локализации деформации и состояние вещества в этих зонах. Эти закономерности локального распределения деформаций в нагруженном объекте контроля проявляются при тепловом контроле за счет термоупругого и термопластического эффектов, когда превращение энергии механического деформирования металла в окрестности дефекта, трещины в тепловую энергию приводит к весьма существенному повышению температуры в данной области.

На рис. 1 приведены термограммы образца под нагрузкой (пластина стальная с отверстиями, материал пластины СтЗсп) при различном уровне пластической деформации (стадии II и III). Они сильно различаются по температуре и распределению областей с повышенной температурой.

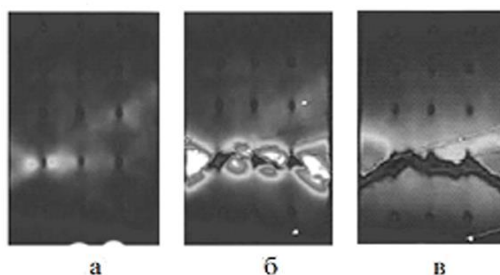


Рис. 1. Термограмма при общей деформации: (а) –  $\epsilon^1_{ij}$  (стадия II); (б) –  $\epsilon^2_{ij}$  (стадия II); (в) –  $\epsilon^3_{ij}$  (стадия III) ( $\epsilon^3_{ij} > \epsilon^2_{ij} > \epsilon^1_{ij}$ ).

Для оценки неоднородности локальных деформаций применены методы, которые позволяют оценить косвенно неоднородность распределения локальных деформаций и напряжений через значения распределения температуры в термограммах. Для получения численных оценок неоднородности использованы методы фрактального анализа в виде мультифрактальных спектров, кластеризация изображений и кратно-масштабный анализ дискретного вейвлет-разложения термограмм. Показано, что при увеличении поврежденности материала увеличивается ширина мультифрактального спектра и как локальные деформации по мере нагружения перераспределяются по длине пластины. А с помощью кратно-масштабного вейвлет-разложения находятся масштабные элементы, которые имеют наибольшие изменения в уровнях деформации.

Наиболее интересны данные по коэффициенту вариации, который возрастает по мере увеличения нагрузки. В момент разрушения коэффициент вариации становится минимальным. Такая же тенденция по среднеквадратическому отклонению. Повышение этих характеристик показывает, что неоднородность локальных деформаций повышается по мере нагружения пластины и уменьшается при ее разрушении.

Таблица 1. Характеристики мультифрактального спектра термограмм при различном уровне общей деформации

Характеристики мультифрактального спектра	Уровень общей деформации, $\epsilon$		
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$
Фрактальный размер, $D_0$	1.511	1.058	1.377
Ширина спектра, $S$	1.05	1.48	1.55
Показатель масштабной однородности, $\Delta q$	1.31	0.91	1.25

Работа выполнена при финансировании по гранту РФФИ №20-19-00769-П.

## Исследование влияния укладки армирования композиционного материала на неоднородность деформаций

Ахметханов Р.С.

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

E-mail: mibsts@mail.ru

Цель статьи - исследование влияния направления армирования в композиционном материале относительно циклической нагрузки на неоднородность распределения напряжений тепловым методом неразрушающего контроля за счет термоупругого и термопластического эффекта. Данный метод широко применяется во всех отраслях промышленности для контроля элементов конструкции и в исследовательских работах. Степень неоднородности напряжений используется при выборе коэффициентов запаса прочности необходимых для обеспечения безопасности технических объектов.

В данном исследовании тепловым методом за счет термоупругого эффекта показана возможность оценки локального распределения напряжений по температурному полю объекта контроля, которые связаны между собой линейно. Приведены исследования на ламинатах из композиционного материала (КМ) с различной укладкой волокнистого наполнителя (стекловолокно) с эпоксидной матрицей по отношению к направлению нагрузки. При этом рассматривались четыре варианта ламинатов: однослойные [0] и [90], трехслойные [0]<sub>3</sub> и [90]<sub>3</sub>. При исследовании были использованы статистические данные и оценки коэффициентов вариации, методы кластеризации и усреднения по длине ламинатов значений распределения температуры по поверхности ламинатов. Получены числовые характеристики распределения локальных температур, которые показывают на более их однородное распределение при армировании материала по направлению нагружения детали (рис. 1). Проведено сравнение интегральных и локальных характеристик распределения температур в образцах. Показаны визуальные отличия в локальном распределении температуры в зависимости от толщины ламината – однослойные и трехслойные. Более равномерное распределение нагрузки по ламинату получено при армировании в направлении нагрузке, и также при увеличении количества слоев армирования (см. таблицу 1).

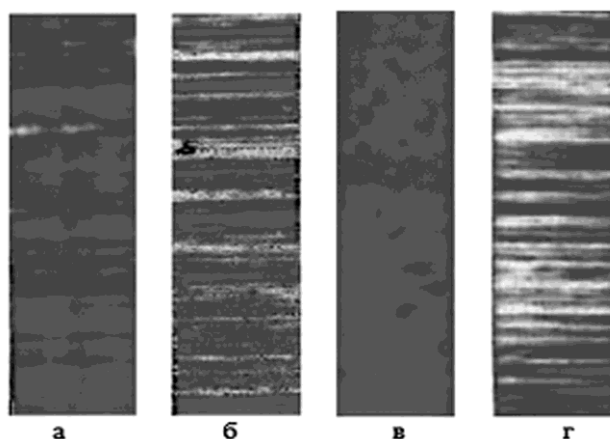


Рис. 1. Термограммы термоупругого отклика образцов от нагружения:  
а) СКМ[0], б) СКМ[90], в) СКМ[0]<sub>3</sub>, д) СКМ[90]<sub>3</sub>

Таблица 1. Статистические данные по распределению температуры в тепловом поле ламинатов

Вариант ламината	СКМ[0]	СКМ[90]	СКМ[0] <sub>3</sub>	СКМ[90] <sub>3</sub>
Среднеквадратическое отклонение	21,060	21,645	17,059	22,355
Математическое Ожидание	131,149	129,285	144,544	129,465
Мода	130,0	118	163	115
Коэффициент вариации, %	16,05	16,74	11,80	17,26

Как видно из термограмм термоупругих изображений (рис. 1), что есть различия в приращениях температуры  $\Delta T$ , полученные для образцов ламинатов с различной ориентацией укладки относительно нагружения. Существуют значительные различия в термоупругом изменении температуры для образцов СР[0] и СР[90]. При ориентации 0° слоев армирования приводит к более однородному распределению температур (напряжений). И материал ламинатов является намного более однородными, когда ламинат состоит из нескольких слоев.

## Топологическая оптимизация элементов конструкций, изготовленных с помощью аддитивных технологий

Власов Д.Д.

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

E-mail: danila\_vlasov\_98@mail.ru

Создание элементов конструкций небольшой массы с высокими показателями прочности и жесткости – основная задача конструкторов во всех областях промышленности. Долгое время единственным методом решения этой задачи поиска оптимума был подбор материала конструкции, который обладал бы необходимыми удельными характеристиками. Однако с активным развитием аддитивных технологий стал доступен принципиально другой подход – топологическая оптимизация конструкции.

Оптимизация топологии – математический метод, позволяющий перераспределять материал детали, исходя из заданных граничных условий, целевой функции и наложенных ограничений. Причем, оптимизация детали происходит именно за счет изменения и переработки ее топологии. Данный инструмент начал активно применяться благодаря распространению численных методов, в особенности – метода конечных элементов (МКЭ). Алгоритм топологической оптимизации, встроенный в стандартные расчетные комплексы, состоит из следующих этапов:

1. Создается модель элемента конструкции в CAD системе;
2. Модель детали разбивается на сетку конечных элементов, задаются характеристики материала;
3. Задаются граничные условия (закрепления, приложенные усилия, контакты);
4. Проводится расчет конструкции, определяются напряжения и деформации в каждом элементе;
5. Задаются целевая функция (масса, объем) и ограничения (условия по жесткости, максимальным напряжениям, размер конечного элемента) для дальнейшей оптимизационной задачи;
6. Основной этап оптимизации состоит в итерационном перераспределении плотности  $\rho$  конечных элементов за счет присвоения им значения «0» при исключении конечного элемента и «1», если конечный элемент остается в модели. Назначение плотности элементам происходит на основе заданных граничных условий и ограничений;
7. Последний этап заключается в проведении проверочного расчета детали с оптимизированной топологией с целью проверки соблюдения программой заданных условий и ограничений.

В результате топологической оптимизации форма детали существенно изменяется и становится «биоподобной» (рис.1). Это значительно осложняет изготовление таких элементов конструкций стандартными технологиями (фрезерование, точение). Однако аддитивные методы производства позволяют решить эту технологическую задачу и приблизить практическое использование оптимизации топологии деталей.

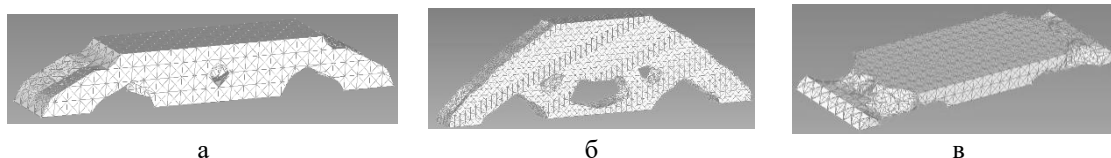


Рис. 1. Топологическая оптимизация балок для трехточечного изгиба: А - 20x20; Б – 40x10; В – 10x40

Поскольку результаты численных проверочных расчетов в значительной степени зависят от граничных условий и могут отличаться от результатов натуральных экспериментов, большой интерес представляет практическая проверка справедливости оптимизационного алгоритма с точки зрения удовлетворения условий по жесткости и прочности полученной детали.

Для исследования этого вопроса была проведена оптимизация топологии трех типов балок одинаковой длины (рис. 1). Площадь поперечного сечения балок была постоянной и составляла  $400 \text{ мм}^2$ , при этом размеры сечения различались: 40x10 мм, 20x20 мм, 10x40 мм. Материал балок – пластик PETG для 3D печати. Поскольку, за счет особенностей аддитивных технологий производства, материал получаемой детали может обладать явной анизотропией свойств, необходимо проведение предварительных испытаний напечатанных образцов.

В ходе испытаний было установлено близкое сходство упругих характеристик в разных направлениях (что необходимо для алгоритма топологической оптимизации), а также были определены сами механические свойства материала для проведения численных расчетов в МКЭ-пакете.

Оптимизированные балки были изготовлены с помощью 3D принтера Anisoprint COMPOSER A3. Испытания на трехточечный изгиб проводились при фиксации полей деформаций помощью установки корреляции цифровых изображений (КЦИ) Vic 3D. Результаты экспериментов сравнивались с полями деформации, полученными в ходе проверочных численных расчетов оптимизированных балок.

[1]. Троицкий В.А., Петухов Л.В. Оптимизация формы упругих тел. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1982. 432с.

[2]. Larsson R. Methodology for Topology and Shape Optimization: Application to a Rear Lower Control Arm; Master's thesis in Applied Mechanics. Göteborg, 2016.

## Адгезионные характеристики композиционных материалов, изготовленных методами аддитивных технологий

Власов Д.Д., Поляков А.Э., Татусь Н.А.

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

E-mail: danila\_vlasov\_98@mail.ru

Одно из основных отличий композиционных материалов от металлов и сплавов состоит в том, что конструкция и материал создаются одновременно, причем часто без применения механической обработки. Основным принципа всех традиционных технологий создания композитных конструкций, если речь идет о волокнистых композитах с полимерной матрицей, заключается в пропитке выложенных в форму армирующих волокон жидким терморезактивным связующим. Отдельные технологии выделяются по принципу приложения давления для пропитки (атмосферное, в автоклаве и т.д.), очередности технологических операций и степени автоматизации процесса. В результате протекания полимерного связующего вдоль всей поверхности волокон и последующего его отверждения образуется граница раздела волокно-матрица, которая в значительной степени определяет механические характеристики композита. Причем, на качество созданного адгезионного соединения влияет большое количество факторов как технологического, так и физико-химического характера. По этой причине адгезионная прочность границы раздела изучается во многих работах; создаются новые подходы и методы улучшения качества соединения (например, активация волокон перед пропиткой).

Появившиеся не так давно полимерные волокнистые композиты, изготовленные с помощью аддитивных технологий, представляют собой новый и малоизученный класс материалов, особенно в области адгезионной прочности. Технологии наплавления нитей (Fused Deposition Modeling, FDM) и послойного наплавления (Fused Filament Fabrication, FFF) 3D печати принципиально отличаются от традиционных методов: послойное «выращивание» детали происходит с помощью двух нагретых сопел (рис. 1.а) – из одного сопла подается расплавленный термопластичный полимер для матрицы, а из второго – непрерывное волокно. Причем, формирование матрицы и заполнение ее армирующими элементами происходит последовательно, и матрица успевает практически полностью полимеризоваться до введения в рабочую зону волокна. Именно по этой причине при последующей подаче волокна оно также отдельно пропитывается полимерным связующим для образования соединения с матрицей. Также следует отметить, что:

1. волокна для 3D печати подаются в сопло с бобины, а потому, для исключения возможности их преждевременной размотки, запутывания или распушения, они пропитываются на производстве другим полимером, отличным от матрицы (например, эпоксидной смолой);

2. за счет особенностей послойной технологии печати, полимерная матрица формируется вдоль определенных направлений, что для некоторых полимеров может привести к явной анизотропии свойств самой матрицы.

Отмеченные выше технологические особенности делают актуальным вопрос изучения адгезионной прочности границы раздела в новых материалах. Для проведения исследования на 3D принтере Anisoprint COMPOSER A3 были изготовлены образцы специальной формы, схема которых показана на рис. 1 б).

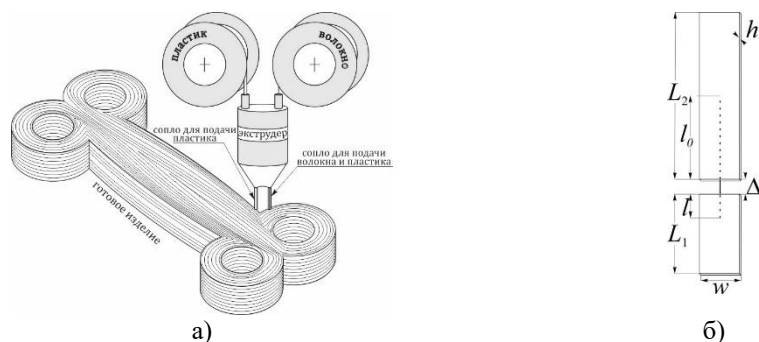


Рис. 1. а) принципиальная схема 3D печати композитных элементов, б) образец для испытаний на адгезионную прочность

Углеродная нить диаметром 0,35 мм удерживается двумя полимерными (PLA пластик) пластинами, между которыми есть пустое пространство. Со стороны более короткой пластины длина «заделки» нити  $l$  изменялась от 3 до 40 мм. Серии образцов испытывались на растяжение до полной потери несущей способности. В ходе испытаний производилась фиксация полей деформации на поверхности образца с помощью метода корреляции цифровых изображений Vic 3D.

Полученные результаты испытаний позволили определить критическую длину нити, при которой адгезионная прочность соединения была максимальной. Характер разрушения образцов, а также количественные данные проведенных экспериментов показали, что, несмотря на значительные технологические отличия методов производства, композиты, изготовленные с помощью аддитивных технологий, практически идентичны традиционным.

## Моделирование информационной эффективности диагностирования с использованием нечетких методов

Дубинин Е.Ф., Куксова В.И.

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

E-mail: mibsts@mail.ru

Развитие диагностических систем (ДС) как важной составляющей безопасности функционирования сложных технических систем привело к необходимости оценки и анализа эффективности самих ДС.

Эффективность диагностирования во многом определяется качеством и безопасностью информации о состоянии объекта диагностирования (ОД) и самой диагностической системы; поэтому моделирование функционирования ДС как информационной системы является важным аспектом оценки ее эффективности [1, 2]. Моделирование предполагает совместное использование в анализе различных, в том числе слабо формализуемых переменных, хорошо описываемых нечеткими методами. Одним из возможных подходов к оценке информационной эффективности ДС с применением аппарата нечетких множеств является предлагаемый метод моделирования с определением критериальных параметров эффективности.

Для формирования нечеткой модели информационной эффективности ДС предлагается рассмотреть два взаимосвязанных множества переменных, включающих:

- информационные характеристики (показатели) диагностической системы  $X_i^j, (i=1, n)$ ;
- показатели, оценки и события, характеризующие проявление недостатков системы  $Y_j, (j=1, m)$ .

К информационным характеристикам ДС можно отнести среднюю наработку на отказ или информационный сбой; быстродействие диагностирования; наличие резервной мощности; число параметров ОД, охваченных контролем; погрешность измерения и др. Недостатками являются вероятность пропуска полезного сигнала, большой период запаздывания, слабая защита от несанкционированного доступа.

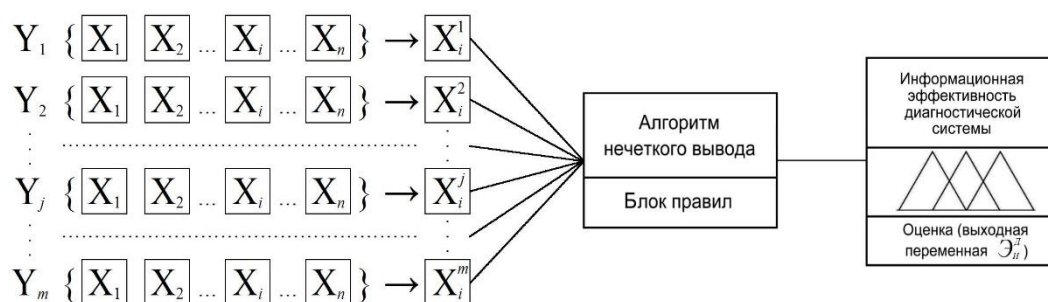


Рис.1. Схема оценки информационной эффективности ДС

Эффективность диагностической системы, количественно описываемой множествами  $X_i^j, (i=1, n)$  и  $Y_j, (j=1, m)$ , может быть определена на основе процедуры, включающей 7 основных этапов, схема которой представлена на рис.1.

1. Формируется множество информационных характеристик ДС  $X_i^j, (i=1, n)$ .
2. Формируется множество показателей, оценок и событий, характеризующих проявление недостатков информационного и программного обеспечения ДС  $Y_j, (j=1, m)$ .
3. Для каждого показателя из множества  $Y_j, (j=1, m)$  выбирается критериальный параметр  $X_i^j, (i=1, n)$ , значение которого в наибольшей степени определяет величину (оценку)  $Y_j$  (алгоритм см. в работе [3]).
4. Формируется факторное пространство нечеткой модели: все критериальные параметры приводятся к условиям нечеткости и для них выбираются функции принадлежности.
5. Назначается интервальная или лингвистическая выходная переменная  $\mathcal{E}_i^j$  «Информационная эффективность диагностической системы» с терм-значениями {Низкая, Недостаточная, Достаточная, Приемлемая, Высокая}.
6. Выбирается алгоритм нечеткого вывода и формируется база продукционных правил.
7. Проводится оценка информационной эффективности диагностирования.

Таким образом, предлагаемая процедура может быть использована для определения информационной эффективности ДС.

[1]. Махутов Н.А., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Оценка и повышение эффективности диагностических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. № 4. С.8-24.

[2]. Dubinin E.F., Kuksova V.I. Application of fuzzy logic methods for analysis of the efficiency of a diagnostic systems. В сборнике: AIP Conference Proceedings. 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2020. Ekaterinburg, 2020. С. 040015.

[3]. Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Анализ эффективности диагностических систем с использованием методов нечеткой логики // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2022. № 6. С.29-37.



## Оценка надежности оператора с помощью нечетких методов

Дубинин Е.Ф., Куксова В.И.

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

E-mail: mibsts@mail.ru

Безопасность сложных производственных объектов во многом зависит от действий персонала в системе «человек – техника – среда» на всех стадиях жизненного цикла. В этой связи важен учет эргономических факторов риска при проектировании и последующей эксплуатации сложных технических систем (СТС).

Важной характеристикой, определяющей значение человеческого фактора в эргатической системе, является надежность оператора, оцениваемая по критериям безошибочности, готовности, восстанавливаемости, своевременности, эффективности его деятельности. Методы и модели, используемые для изучения проблемы надежности оператора, зависят от особенностей объекта и целей исследования, выбранных критериев и имеющихся ресурсов. Однако, при всем различии программ и методов исследования влияния надежности оператора на безопасность СТС, они схожи общими конечными целями. Это наиболее полное и безопасное выполнение системой своих функций и обеспечение комфортных и безопасных условий деятельности оператора.

Многие характеристики надежности оператора являются неопределенными, неполными, слабо формализованными и трудно поддаются учету в классических дискретных моделях. Модели, основанные на применении нечетких методов (НМ), позволяют достаточно эффективно их формализовать. Преимуществом использования НМ также является возможность выбора по результатам моделирования оптимального алгоритма управляющих решений, базирующегося на ранжировании опасностей и распределении вероятностей. Вместе с тем применение НМ требует в каждом случае разработки оригинальной модели и специального программного обеспечения, а также участия квалифицированных экспертов.

Для формирования многофакторной модели надежности оператора предлагается воспользоваться классификацией, в соответствии с которой факторы надежности оператора подразделяются на объективные, обусловленные воздействием внешней среды, и субъективные. Схема моделирования приведена на рис.1 [1, 2].

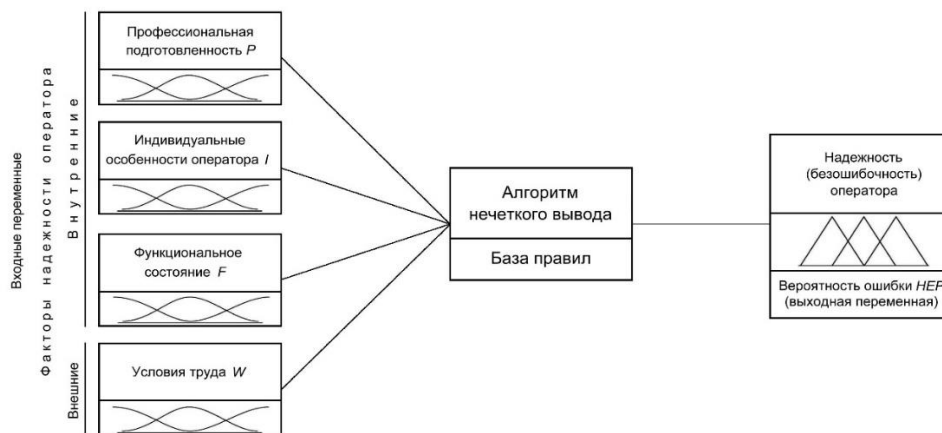


Рис.1. Схема нечеткой модели надежности оператора

К субъективным (внутренним) факторам надежности оператора отнесены его профессиональная подготовленность  $P$ , индивидуальные особенности  $I$  и функциональное состояние  $F$ .

Объективные (внешние) факторы надежности оператора определяются условиями его работы, характером решаемых задач, организацией труда, т.е. уровнем комфортности условий труда оператора  $W$ .

В качестве критерия надежности выбрана безошибочность действий оператора. В качестве выходной переменной в этом случае можно использовать нечеткую интервальную либо лингвистическую переменную «Вероятность ошибки  $НЕР$ ».

Результаты моделирования надежности оператора могут быть использованы при разработке моделей более высокого уровня иерархии для анализа риска. Так, полученная нечеткая оценка надежности оператора может быть включена в качестве входной переменной в модель надежности СТС, либо в модель техногенного риска.

[1]. Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Анализ надежности оператора с помощью методов нечеткой логики // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2023. №3. С. 36-44.

[2]. Dubinin E.F., Kuksova V.I. Safety assessment of technical objects and systems using fuzzy logic methods. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 1." 2022. С. 022016.

## Несущая способность резинокордных оболочек с двумя монослоями корда

Евдокимов А.П.

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

E-mail: a\_evdo@mail.ru

Соединительные муфты с торообразной резинокордной оболочкой (РКО) применяют во многих отраслях промышленности (транспортном машиностроении, нефтегазовой отрасли, судостроении) благодаря высоким крутильным и компенсационным свойствам. Одним из существенных недостатков такой оболочки в силовых приводах локомотивов является сравнительно низкий ресурс на повышенных частотах вращения, т.е. свыше 2500 об/мин. [1]. В результате возникновения значительных динамических нагрузок увеличиваются осевые и радиальные нагрузки, возрастает температура оболочки, появляются дефекты в виде трещин на наружной и внутренней поверхности упругого элемента.

В целях увеличения ресурса РКО и снижения опасности элементов конструкций тягового железнодорожного транспорта [2] был разработан и изготовлен опытный образец РКО типа ЭМ320×80 с внутренней структурой: каркас-протектор-каркас-покровная резина (рис. 1, а). Серийная оболочка имеет структуру: каркас-протектор-покровная резина (рис. 1, б).

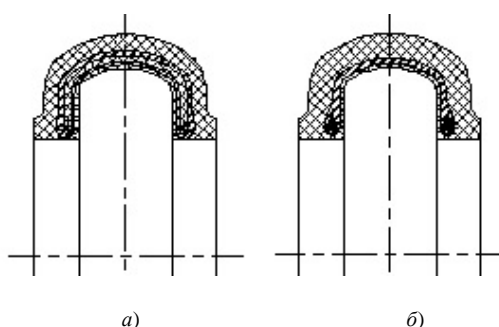


Рис. 1. Резинокордная оболочка с внутренней структурой: а) каркас-протектор-каркас-покровная резина; б) каркас-протектор-покровная резина

Были проведены сравнительные экспериментальные исследования (статические, динамические и усталостные) упругих соединительных муфт с серийной и опытной РКО. При статических испытаниях определяли значения осевой и радиальной жёсткости; динамических – осевые и радиальные силы; усталостных – долговечность РКО на повышенных частотах вращения, а также демпфирующую способность по амплитуде затухающих колебаний.

Полученные результаты испытаний показали следующее: площади петель гистерезиса были выше, чем на серийной оболочке. При этом осевые и радиальные силы на опытной РКО были ниже. Исследованиями на усталость установлено, что долговечность опытной РКО составила  $10^6$  циклов до начала разрушения (рис. 2), в то время как на поверхности серийной оболочки дефекты возникали через  $10^4$  циклов.

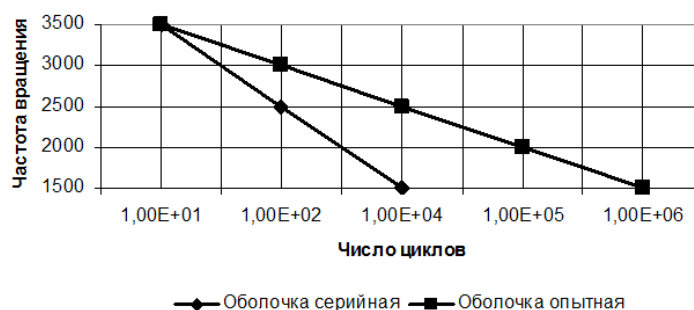


Рис. 2. Ресурс резинокордной оболочки

[1]. Михальченко Г.С., Коссов В.С. Теория и конструкция локомотивов. – М.: Маршрут, 2006. – 584 с.

[2]. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности железнодорожного транспорта / научный рук. Н.А.Махутов. – М.: МГОФ «Знание», 2020. – 720 с.

## Количественное описание процесса повреждаемости при циклическом нагружении композиционной пластины с отверстием

Елеонский С.И., Писарев В.С., Зайцев М.Д.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия

E-mail: juzzerka@mail.ru

Разработан новый экспериментальный метод, который обеспечивает количественное описание эволюции индикаторов повреждаемости при циклическом нагружении композиционных образцов с концентраторами напряжений [1]. Параметры повреждаемости определяются, как деформационный отклик на нанесение искусственного надреза заданной длины (рис. 1), который распространяется от контура центрального сквозного отверстия в плоском прямоугольном образце при постоянной внешней нагрузке (рис. 2).

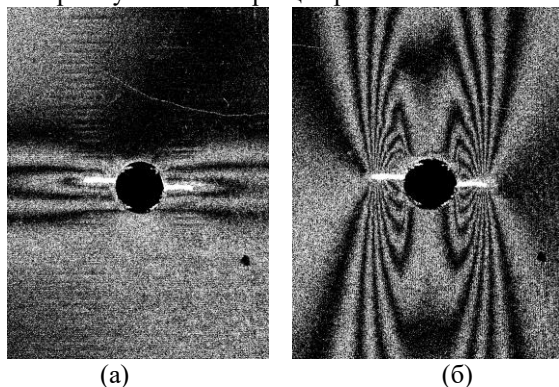


Рис. 1. Деформационный отклик в виде картин интерференционных полос, полученных в терминах плоских компонент перемещений  $u$ (а) и  $v$ (б)

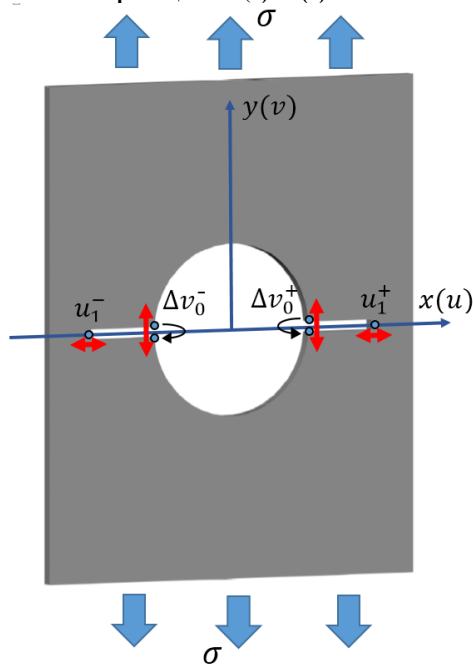


Рис. 2. Искусственный надрез и индикаторы повреждаемости

По результатам испытаний восьми образцов получены текущие величины индикаторов повреждаемости на различных этапах усталостного нагружения. Эти данные выявляют зависимости искомых параметров от количества циклов нагружения. На этой основе для рассмотренного диапазона циклов построена функция накопления повреждений. Установлено, что эта функция относится к первой стадии исследуемого процесса. Полученные результаты являются необходимой основой планирования дальнейших экспериментов.

[1]. Дзюба А.С., Елеонский С.И., Писарев В.С., Яштугин А.Г. Влияние длины искусственного надреза в композиционном материале на величины индикаторов повреждаемости. Журнал Технической Физики. 2023. Т93, №3, с. 371-379.

# Оценка долговечности конструкций при нестационарном случайном нагружении с применением метода вариационной модовой декомпозиции

<sup>1</sup>Ерпалов А.В., <sup>1</sup>Хорошевский К.А., <sup>2</sup>Гадолина И.В., <sup>1</sup>Румянцева Е.А.  
<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;  
 E-mail: erpalovav@susu.ru  
<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

## Цель

Разработка нового метода оценки долговечности конструкций с нестационарной случайной историей нагружения на основе применения адаптивного метода вариационного модового разложения случайного процесса.

## Актуальность

Машиностроительные конструкции в процессе своей работы чаще всего испытывают внешнее воздействие в виде вибраций разной интенсивности. Длительное воздействие вибрации приводит к возникновению микрповреждений, которые накапливаются, образуя трещины, и в итоге конструкция разрушается. В эпоху цифровой трансформации большинство агрегатов оснащается разнообразными датчиками, использование информации которых позволяет разрабатывать интеллектуальные модели прогноза долговечности. Существующие традиционные алгоритмы оценки ресурса (в частотной области) имеют ограничения по типам случайных процессов – рассматриваются только стационарные процессы, для которых математический аппарат достаточно хорошо развит и используется для оценки долговечности. Однако в реальной эксплуатации преобладают нестационарные воздействия (статистические характеристики процесса изменяются во времени). В связи с этим исследователи постоянно разрабатывают новые подходы, учитывающие нестационарность процессов. Однако, все существующие на текущий момент работы рассматривают только определённые типы нестационарных процессов и не имеют адаптивного алгоритма для анализа широкого диапазона нестационарных процессов.

## Описание метода вариационной модовой декомпозиции

Идея разложения сигнала в набор эмпирических мод появилась в 1998 году с появлением метода эмпирической модовой декомпозиции [1]. В дальнейшем метод получил развитие и появился метод вариационной модовой декомпозиции (VMD) [2], суть которого заключается в разложении любого исходного сигнала в указанное число простых узкополосных случайных процессов (IMF).

Алгоритм VMD заключается в итерационном подборе случайных процессов по заданным критериям, оперируя такими алгоритмами, как фильтр Винера, преобразование Гильберта и метод смешения мод.

## Предложенный метод оценки долговечности

При разложении исходного процесса в набор мод – процессы становятся стационарными и узкополосными. Выделяются наиболее значимых IMF с точки зрения усталости и находятся плотности распределения максимумов по Релею. Полученные плотности усредняются и оценивается долговечность на основе линейной гипотезы суммирования повреждений. Предложенный метод представлен на рис. 1.

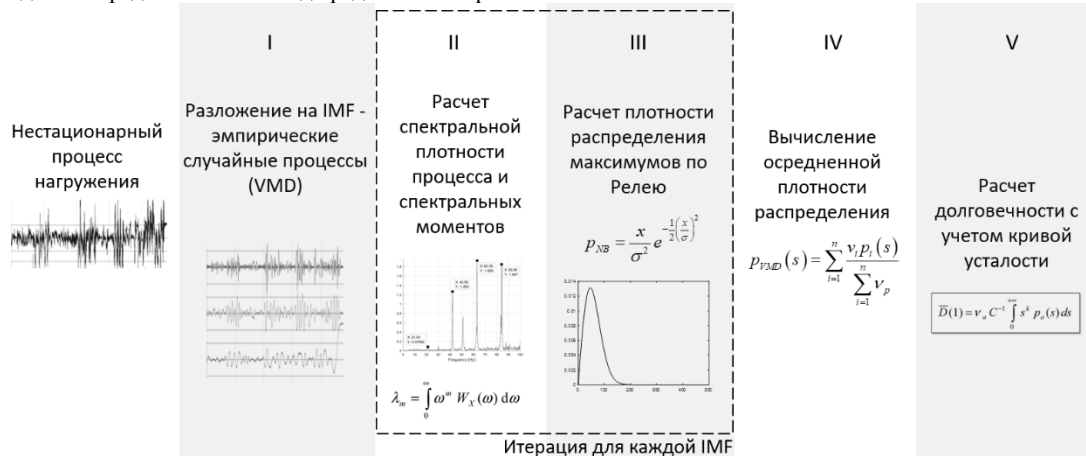


Рис. 1. Структурная схема предложенного метода оценки долговечности

## Сравнение с другими методами

Для оценки долговечности по предложенному методу сгенерирован ряд стационарных и нестационарных случайных процессов разных типов. За референтные значения долговечности приняты долговечности, полученные методом «падающего дождя» во временной области. Оценивалась разница (в процентах) между методом «дождя» и предложенным. Помимо этого, сопоставлялись сравнения существующих методов в частной области с методом «дождя». В результате сравнения предложенный метод оказался на 10-60% лучше традиционных частотных методов в зависимости от типа заданного случайного процесса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>

[1]. Huang N.E. The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., 1998. Vol. 454, N 1971, p. 903–995.

[2]. Dragomiretskiy K. Variational Mode Decomposition. IEEE Trans. Signal Process, 2014. Vol. 62, N 3, p. 531–544.

# Определение неоднородных остаточных напряжений по тангенциальным компонентам вектора перемещений

Завойчинская Э.Б., Плотников А.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

asp.model.gk@gmail.com

Изменение перемещений точек поверхности тела при наращивании в нём некоторой несплошности представляется в виде интегральных уравнений [1, 2]. В частности, в случае распространённого метода сверления отверстий эти уравнения для одноосного напряжения запишутся следующим образом:

$$\begin{cases} u(r, \theta, h) = \int_0^h C(r, \theta, h, z) \sigma_x(z) dz, \\ v(r, \theta, h) = \int_0^h S(r, \theta, h, z) \sigma_x(z) dz. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $h$  – глубина отверстия,  $(r, \theta, z)$  – цилиндрическая система координат, связанная с отверстием. Сложность и трудоёмкость предварительных вычислений заставляла избегать прямого использования уравнений вида (1) для определения коэффициентов, связывающих напряжения и перемещения в случае применения оптических методов регистрации перемещений, дающих большое количество измерений [3]. Показано [4, 5], что процедура нахождения ядер уравнения (1) можно упростить, применив гармоническое разложение функций  $C(r, \theta, h, z)$ ,  $S(r, \theta, h, z)$  с последующим вычислением их при помощи МКЭ в двумерной постановке с применением специальных осегармонических элементов. Тогда при инкрементальном углублении отверстия, приняв компоненты тензора напряжений постоянными в пределах каждого шага, задача определения неоднородных по глубине остаточных напряжений сводится к переопределённой системе линейных алгебраических уравнений.

Основной сложностью обратной задачи нахождения неоднородных остаточных напряжений по данным измерения компонент вектора перемещений является плохая обусловленность систем разрешающих уравнений. Преодолению этого обстоятельства посвящено множество работ и одним из основных направлений является применение регуляризации [6]. Использование переопределённых систем уравнений, особенно в случаях, когда число измерений значительно превышает число определяемых величин, позволяет увеличить точность определения неизвестных величин, не прибегая к регуляризации.

Этот факт проиллюстрирован численным экспериментом. В теле с остаточными напряжениями производилось наращивание отверстия радиусом 1 мм и регистрация перемещений на поверхности. Использовались только те перемещения, которые могли бы быть зарегистрированы в реальном эксперименте. К перемещениям добавлен численный шум со стандартным отклонением 0,01 мкм и нулевым средним. Полученные значения подавались на вход алгоритма, вычисляющего остаточные напряжения по компонентам вектора перемещений описанным выше способом. Результат вычисления компонент тензора напряжений приведён на рис. 1 столбчатой диаграммой, сплошными линиями показаны точные значения. Метод показывает приемлемую точность определения компонент тензора напряжений до величины 1,5 радиуса отверстия без применения регуляризации. При увеличении количества измерений на шаг по глубине точность определения неизвестных компонент тензора напряжения и, в меньшей степени, глубина их достоверного определения, могут быть также увеличены.

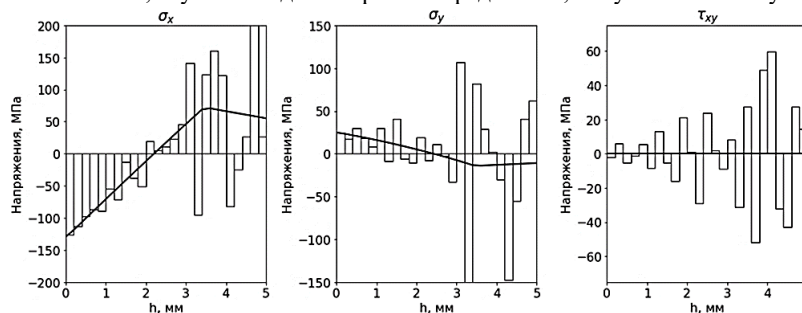


Рис. 1. Результат восстановления напряжений при 340 точках на шаг

[1]. Schajer G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method. // J. of Eng. Materials and Technology. 1988. Vol. 110. No. 4. Part I: pp. 338 – 343, Part II: pp. 344 – 349.

[2]. Razumovsky I.A. Methods for Determination of Inhomogeneous Residual Stress Fields // In: Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, 2002. pp. 125-138.

[3]. Schajer G.S. Optical Hole Drilling Residual Stress Calculations Using Strain Gauge Formalism // Experimental Mechanics, No. 61, 2021. pp. 1369–1380.

[4]. Плотников А.С., Завойчинская Э.Б. О методе определения неоднородного поля остаточных напряжений с использованием цифровой спекл-интерферометрии и метода сверления отверстий // Композиты и наноструктуры, Vol. 14, No. 1 (53), 2022. pp. 16-30.

[5]. Плотников А.С., Завойчинская Э.Б. О методе идентификации неоднородных полей остаточных напряжений // Вестник Московского университета. Математика. Механика, No. 3, 2023. pp. 41-47.

[6]. ASTM E 837-13a. Standart Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. 0301st ed. Philadelphia: ASTM International, 2013. 17 pp.

# Развитие вероятностных методов исследований и расчётов в малоцикловой усталости

Зацаринный В.В.

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

E-mail: v.zatsar@mail.ru

При традиционном детерминированном нормативном подходе статическая и малоцикловая прочность и долговечность материалов и конструкций обеспечивались введением необходимых коэффициентов запаса  $n_\sigma$  в заданных предельных состояниях с использованием расчётных эксплуатационных напряжений  $\sigma^2$  и критических характеристик механических свойств  $\sigma_c$  (ОМС). Учитывая реальную случайную природу прочности и долговечности, а также случайный характер эксплуатационных нагрузок в расчётах на прочность необходимо применение вероятностных методов анализа прочности и надёжности по параметрам вероятности  $P$  с учётом специфики малоциклового нагружения, когда в зонах концентрации конструкций возникают упругопластические деформации [1,2].

Данный подход предполагает оценку вероятности достижения предельного состояния материала на основе использования характеристик рассеяния механических свойств и нагруженности. Это позволяет вычислить заданный прочностной запас по установленной вероятности.

$$\bar{n}_\sigma = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}^2}, \quad n_{\sigma_p} = \frac{(\sigma_c)_p}{(\sigma^2)_p}, \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  – предельное разрушающее напряжение с заданным уровнем вероятности  $P$ ,  $(\sigma^2)_p$  – эксплуатационное напряжение с тем же параметром  $P$ .

При оценках статической прочности пересечение кривых плотностей распределения нагрузки  $\sigma^2$  и несущей способности  $\sigma_c$  соответствует вероятности разрушения  $P_{разр}$ .

Для обоснования применения вероятностных методов исследований было проведено обобщение значительной экспериментальной информации, полученной в ИМАШ РАН, по анализу рассеяния как основных механических свойств (ОМС-  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $S_k$ ,  $\delta$  и  $\psi_k$ ) при статическом разрыве сталей 15X2НМФА и X18Н9 при комнатной (20°C) и повышенных (до 350°C и до 650°C) температурах соответственно, так и долговечностей при малоцикловом нагружении (по 20 образцов на каждую серию)[2]. С целью изучения процессов разрушения проводился статистический анализ закономерностей образования и развития трещин по характеристикам  $P-N(l)$ ,  $P-N(dl/dN)$  в образцах с концентрацией напряжений и в дальнейшем с их расчётной оценкой, а также оценка параметров функций распределения. Для уточненного определения напряжённо-деформированных и предельных состояний (НДС) были проведены расчётно-экспериментальные исследования с применением вероятностных методов описания уравнений состояния и кинетики местных НДС в зонах концентрации с учётом рассеяния базовых характеристик ОМС.

Были получены оценочные расчётные зависимости между вероятностью  $P_{разр}$  и статическими запасами прочности для различных типов объектов техносферы (ракетная, авиационная техника, сосуды давления АЭС). Впервые выявлена довольно значительная вариация упругопластических деформаций при статическом нагружении в координатах  $\bar{\sigma}_n - \bar{\epsilon}_{max}$  для зоны концентрации (до 75%) в зависимости от рассеяния ОМС, что может соответствовать рассеянию ресурса (до 3,2).

Для получения расчётных скоростей роста трещин и их рассеяния, а также текущей долговечности по параметру длины трещины были по аналогии с законом Пэрриса-Эрдогана предложены уравнение и методика расчёта, реализованная на базе нелинейной механики разрушения с использованием величин коэффициентов интенсивности деформации  $\Delta K_{Ie}$  вместо коэффициентов интенсивности напряжений  $\Delta K_I$ .

Определённые таким образом расчётные скорости развития трещин и долговечности по параметру длин трещин удовлетворительно совпадают с их экспериментальными значениями, что указывает на достаточно хорошую применимость разработанной методики (рис. 1)

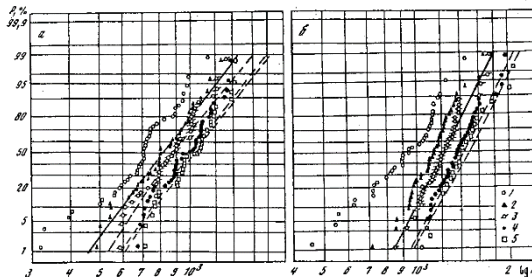


Рис. 1. Экспериментальные и расчётные функции распределения долговечности по параметру длины трещины  $N(l)$  для сталей X18Н9 (а) и 15X2НМФА (б) при нормальной температуре; а:  $\sigma=285$  МПа,  $n=18$ ; б:  $\sigma=527$  МПа,  $n=21$ ; при 1, мм: 1 - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1,0; 4 - 2,0; 5 - 3,0

[1]. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: Фундаментальные и прикладные исследования/Н.А.Махутов. Новосибирск: Наука, 2008. -528 с.

[2]. Махутов Н.А., Зацаринный В.В, Романов А.Н. и др. Статистические закономерности малоциклового разрушения. - М.: Наука, 1989. -252 с.

[3]. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин /Отв. ред. Н. А. Махутов.-М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008.-576 с

# Опыт и перспективы применения методов экспериментального контроля напряжённого состояния термоядерных установок, эксплуатируемых при криогенных температурах

Кукишинов А.И., Маслов С.В., Шубина Н.А.

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

E-mail: maslovsv@inbox.ru

**Цель работы** – разработка усовершенствованных методик и средств экспериментального тензометрического контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) [1] элементов термоядерных установок «токамак», эксплуатируемых в условиях криогенных температур и переменных электромагнитных полей.

**Выполненные исследования и полученные результаты.** Отличительные особенности условий функционирования установок типа «токамак», требующие особого подхода при создании систем мониторинга [2], следующие: криогенные (до 3-5К) температуры элементов конструкции, действие стационарных и импульсных (до 5 – 9 Т) магнитных полей, длительный характер (до 1 года) функционирования систем мониторинга. Для построения измерительных систем, обеспечивающих сбор информации в подобных условиях, требуется выбор первичных преобразователей (тензорезисторов) со стабильными метрологическими характеристиками.

Для разработки методики применения тензорезисторных преобразователей различных типов были проанализированы следующие результаты, полученные в ходе проведенных экспериментальных исследований.

1. Результаты исследования влияния сильных магнитных полей на работоспособность и метрологические характеристики тензорезисторов.

2. Результаты экспериментов по изучению поведения тензорезистивных сплавов при криогенных температурах, подбор или создание тензорезисторов, отвечающих требованиям минимизации погрешностей измерений.

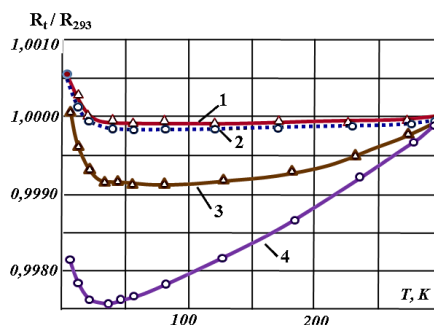
*Влияние сильных магнитных полей на характеристики тензорезисторов.*

Исследования, направленные на изучение влияния магнитных полей с индукцией от 1 до 3 Т проводились на опытном стенде с одновитковым индуктором импульсного поля. Исследования проводились при нормальной температуре. В качестве объектов испытаний были выбраны фольговые тензорезисторы с чувствительными элементами из константана, проволочные (диаметр проволоки 30мкм) тензорезисторы с чувствительными элементами из никельмолибденового сплава НМ23ХЮ и аналогичные – с чувствительными элементами из железохромоалюминиевого сплава 0Х14Ю6ФМ. В результате проведения серии экспериментов было установлено, что полумостовая схема обеспечивает практически полную компенсацию влияния магнитного поля с индукцией 3 Т на все 3 типа исследуемых тензорезисторных преобразователей; не исключенная среднеквадратичная погрешность измерения не превышает  $1 \times 10^{-6}$  единиц относительной деформации.

*Изучение поведения тензорезистивных сплавов при криогенных температурах.* Для разработки тензорезисторов, имеющих оптимальные характеристики при криогенных температурах, изучались свойства тензорезисторных сплавов, имеющих низкий коэффициент электросопротивления (ТКС) в диапазоне температур 3 – 300 К. Изучались сплавы системы Ni – Mo, обладающие высоким остаточным электросопротивлением при сверхнизких температурах, и сплавы системы Fe – Cr – Al с легирующими добавками Mo и V, допускающие регулирование ТКС путём изменения химического состава. Проведенные исследования показали, что свойства сплавов можно улучшить как легированием, так и подбором условий термической обработки. Некоторые результаты исследований ТХС для сплавов системы Ni – Mo приведены на рис.1.

В результате проведенных исследований предложены два прецизионных сплава для изготовления тензорезисторов, предназначенных для диапазона температур 4 – 300 К: сплав НМ23ЮФ и сплав 0Х13Ю5ФМ (последний сплав является магнитным, что ограничивает его применение в условиях воздействия магнитных полей).

Рис.1. Температурная зависимость электросопротивления сплава НМ23ЮФ после закалки и различных



стабилизирующих режимов отжига (1 – закалка; 2 – закалка и отжиг 30 минут при температуре 470°C, 3 – отжиг 2 часа, 4 – отжиг 5 часов)

Результаты проведенных исследований подтвердили возможность создания средств тензометрического контроля НДС, работоспособных в условиях эксплуатации опытных термоядерных установок со сверхпроводящими обмотками электромагнитной системы удержания плазмы.

1. Албагачиев А.Ю., Алексеева С.И., Ахметханов Р.С., и др. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин Ответственный редактор Мазутов Н.А., Москва, издательство "Книжный дом "ЛИБРОКОМ" 2019 – 576 с.

2. Маслов С.В. Исследование напряжённого состояния действующего оборудования методом тензометрии для уточнения условий прочности и ресурса//Машиностроение и инженерное образование. 2021. №3-4(67). С. 16-27. EDN: NFLARX

## Прогнозирование порога развития усталостных трещин в элементах железнодорожных конструкций

Лебединский С.Г.

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

E-mail: slebedinski@yandex.ru

Предложен метод снижения уровня нерегулярного эксплуатационного нагружения, по мере роста трещины, с сохранением его подобия (суть алгоритма):

Решалась задача снижения уровня нагружения так, чтобы сохранить соотношения между параметрами отдельных циклов эксплуатационного процесса и их последовательность. То есть сохранить подобие записанному в эксплуатации процессу нагружения, но при этом обеспечить постепенное снижение его уровня.

На испытательном стенде, при воспроизведении эксплуатационного процесса нагружения на образце с трещиной записывается процесс смещения берегов трещины. После этого управление стендом переводится на канал экстензометра, (т.е. в режим жесткого нагружения). Задающим сигналом управления становится, записанный перед этим процесс с экстензометра. Таким образом, испытательным стендом обеспечивается нагружение в соответствии с записью смещения берегов трещины. С развитием трещины, при последовательной отработке блоков, жесткость образца снижается и, соответственно, возрастает его податливость. Чтобы отработать записанный ранее с экстензометра процесс нужно, с ростом трещины, все меньше прикладывать усилия. То есть, с ростом трещины процесс в нагрузочном измерении будет постепенно снижаться (рис. 1).

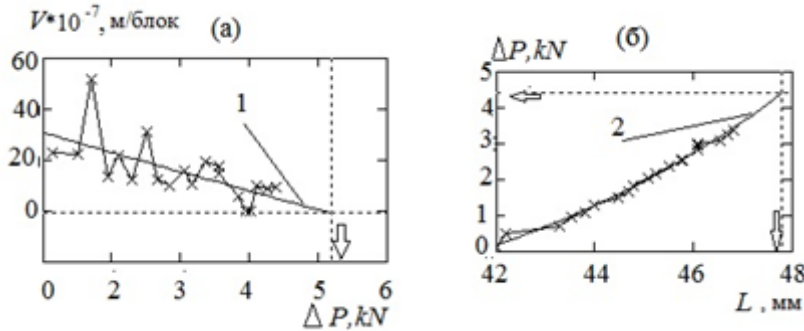


Рис. 1. Экспериментальные зависимости: (а) – изменение скорости развития трещины  $V$ , (м/блок), при снижении максимальной нагрузки в блоке на величину  $\Delta P$ ; (б) – изменение  $\Delta P$  с развитием трещины  $L$ , (мм); точки – эксперимент: 1 и 2 – аппроксимирующие функции с экстраполяцией на скорость трещины  $V=0$  (по стрелке)

Оценка порогового уровня коэффициента интенсивности напряжения (КИН). Полученные экстраполяцией пороговая, в условиях эксперимента длина трещины, и соответствующий ей уровень нагружения с максимальной нагрузкой в блоке 9,64 кН и коэффициенте подобия равном  $\gamma = 0,70$  позволяют получить оценку порогового блока нагружения в виде соответствующей последовательности циклически изменяющегося КИН (в расчёте для С(Т)-образца, внецентренное растяжение). То есть процесса в выражении КИН, при котором трещина останавливается.

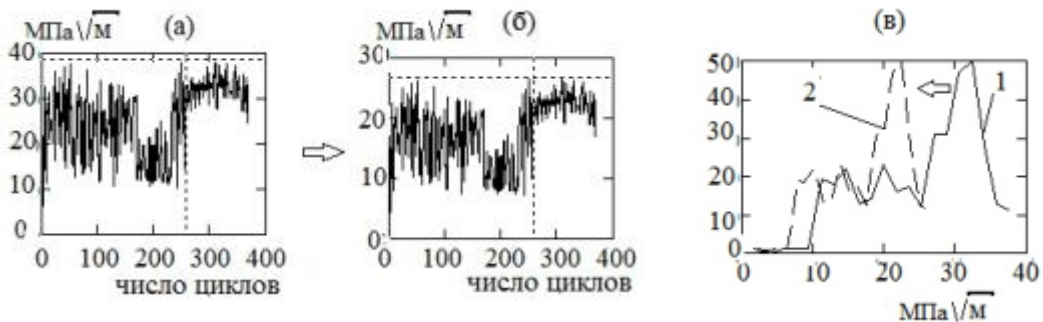


Рис. 2. (а) – процесс изменения КИН по исходным условиям эксперимента (а)-  $P_{max} = 13,74$  кН и  $L = 42$  мм; (б) – прогнозируемый процесс КИН порогового уровня; (в) – гистограммы исходного - (1) и порогового - (2) процессов

Таким образом, предложен и апробирован метод снижения уровня эксплуатационной нагрузки по мере увеличения податливости образца с ростом трещины, при воспроизведении фиксированного процесса раскрытия ее берегов. Метод позволяет получить оценку эксплуатационного процесса нагружения, при котором усталостная трещина не будет развиваться.



## Закономерности нелинейных процессов разрушения аустенитной стали в широком диапазоне номинальных напряжений и температур

Макаренко И.В., Макаренко Л.В.

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

E-mail: I.V.Makarenko@yandex.ru

В работе представлены закономерности процесса разрушения и параметров кинетики полуэллиптических трещин при малоцикловом нагружении в температурном диапазоне от 295 K до 77 K. Дан анализ фрактографических параметров макро-, мезо- и микрорельефа поверхностей разрушения при изменении исходной направленности трещин, с учетом локальных удельных энергий упруго-пластических деформаций по их контуру. Исследованы варианты нелинейных определяющих соотношений и характеристик нелинейной механики разрушения, регламентирующих и моделирующих эксплуатационный ресурс, живучесть и прочность деталей современных силовых и энергетических конструкций, работающих в условиях низких, криогенных температур. При этом проведена сравнительная характеристика экспериментальных и численных результатов исследования для широкого класса исследуемых аустенитных сталей с учетом работ [1-7]. Численные расчеты проводились на базе программных комплексов ANSYS и MATLAB.

Данная задача актуальна для конструкций объектов новой атомной, ракетно-космической, авиационной техники с учетом возникновения и развития в них локальных упругопластических разрушений типа разноориентированных полуэллиптических трещин, в широком диапазоне криогенных температур. Эффективная и безопасная эксплуатация таких сложных агрегатов с учетом наличия, возникновения и развития в них дефектов типа трещин является важной задачей, как в научном, так и в практическом аспекте.

На основе деформационного критерия разрушения с использованием экспериментальных, численных и аналитических методов с учетом пространственного распределения механических свойств, локальных напряжений и деформаций получены кинетические зависимости и критические параметры упругопластического деформирования и разрушения для развивающихся наклонных поверхностных малоцикловых полуэллиптических трещин при комнатной и криогенной температуре.

Экспериментальные исследования развития проведены для разноориентированных поверхностных полуэллиптических трещин при упругопластическом нагружении с коэффициентом асимметрии цикла, равном -1, максимальных номинальных напряжениях цикла, превышающих предел текучести  $\sigma_T$  на 10%, 40% и 90% в аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T. Электронно-микроскопический анализ поверхности разрушения проведен для исходных полуэллиптических трещин, которые наносились под углами наклона в диапазоне от  $\beta = \pi/2$  до  $\beta = \pi/6$  к направлению нагружения.

На основании деформационных критериев нелинейной механики разрушения [1] и работ [2, 3] выполнена количественная оценка фрактографических особенностей и скорости малоциклового разрушения с учетом прочностных характеристик материала, объемности напряженно-деформированного состояния в локальных зонах разрушения, угла наклона начальных трещин, уровня амплитуд напряжений и температуры.

С использованием экспериментальных результатов, аналитических и численных расчетов предложено обоснование формоизменения развития исходных разно ориентированных малоцикловых поверхностных полуэллиптических трещин, отвечающее первой модели нелинейной механики разрушения на стадиях перед окончательным разрушением

Оценка кинетики формоизменения поверхностей разрушения с учетом характеристик микро-мезо-и макрорельефа, показала возможность уточняющего обоснования прочности, эксплуатационного ресурса и живучести элементов конструкций ответственного оборудования.

Это имеет важное значение для объектов криогенной техники, имеющих сложный состав исходных дефектов, широкий диапазон температур эксплуатации, ограниченное число циклов нагружения номинальными и локальными напряжениями на уровне и выше предела текучести, физико-механической неоднородности свойств.

[1]. Махутов Н.А.. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. - Новосибирск, «Наука», 2005, - 1110с.

[2]. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V.. Particularities a micro-mechanism of cycle elastic-plastic fracture and damage. Works of the International Conference. "In-service damage of materials, its diagnostics and prediction". Ternopil Ivan Pul'uj State Technical University, Ukraine. September 21 – 24, 2009. 96 – 102 p.

[3]. Makhutov N. A., Makarenko I. V. and Makarenko L. V.. Paths of the semi-elliptical inclined surface cracks under complex low-cycle loading. // 2452-3216 © 2021, Procedia Structural Integrity, 2022, Vol. 39, No. , pp. 266–272.

[4]. Physical Mesomechanics of Media and Computer-Aided Design of Materials/Ed by V.E. Panin. - Cambridge: Cambridge Interscience Publishing, 1998. – 450 p.

[5]. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Лунев А.Г. От макро к микро. Масштабы пластической деформации. Новосибирск: Наука. – 2018. – 130 с.

[6]. Шаняевский А.А. Масштабные уровни процессов усталости металлов / Физическая мезомеханика. 2014. Т.17. №6. С. 87-98.

[7]. S.V. Panin et al., Impact toughness of 12Cr1MoV steel. Part 1 - Influence of temperature on energy and deformation parameters of fracture, Theor. Appl. Fract. Mech. (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.12.008>. (accepted for publication).

# Расчётно-экспериментальное исследование напряженного состояния методом натурной тензометрии с применением алгоритмов решения обратных задач

Маслов С.В.

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

E-mail: maslovsv@inbox.ru

**Цель работы** – разработка комбинированного расчётно-экспериментального метода определения напряженно-деформированного состояния (НДС) действующего оборудования - корпусов, трубопроводов, теплообменников для уточнения ресурс, зависящего от фактически реализованных режимов нагружения [1,2].

**Применяемые методы и полученные результаты.** Непосредственный экспериментальный контроль состояния действующего оборудования не позволяет получить информацию о максимальных напряжениях в опасных зонах конструкций из-за невозможности установки датчиков в требуемых точках. Необходимо использовать алгоритмы, позволяющие связать величины экстремальных напряжений с параметрами, измеряемыми в доступных зонах конструкции. Предложено использовать алгоритмы решения обратных задач теплопроводности и термоупругости [2, 3], принципы формирования которых показаны на рис. 1а, для следующих случаев.

1. Исследования напряжений, возникающих на внутренней поверхности трубопроводов при пульсациях и скачкообразных изменениях температуры теплоносителя на основе измеренных функций изменения температуры и напряжений на доступных участках наружной поверхности. Для установившегося характера пульсации используется решение обратной задачи теплопроводности с сопоставлением полученного результата с измеренными значениями кольцевых напряжений на наружных поверхностях, как это показано на рис. 1б.

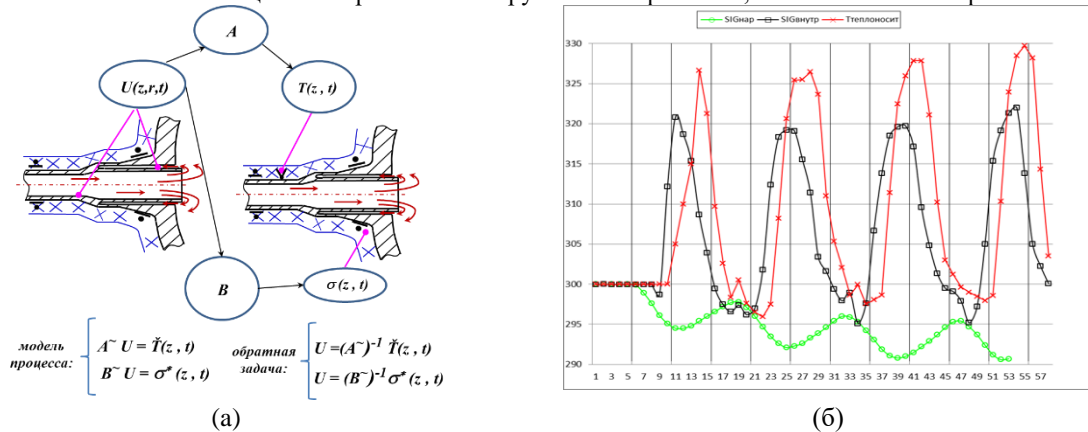


Рис.1. Схема и результаты применения алгоритмов решения обратных задач для определения НДС в недоступных зонах: (а) – формирование алгоритма обратных задач теплопроводности и термоупругости; (б) – измеренные температуры наружной поверхности трубопровода АЭС (°С, внизу) и восстановленные: кольцевые напряжения (Мпа, средняя кривая) и температура теплоносителя (°С, верхняя кривая)

2. Определение напряжений в зонах сопряжений элементов различной жёсткости и теплоемкости по результатам тензоизмерений в доступных точках наружной поверхности. Целесообразно использовать алгоритм решения обратной задачи термоупругости (рис. 1.а, нижняя строка). В результате проведенного анализа предложено использовать алгоритм последовательного (по шагам времени) восстановления функции изменения температуры теплоносителя, основанный на формуле:

$$\sigma_n^j = \sum_{i=0}^k \varphi_{i+1}^{(j)} \Delta T_{n-i}$$

где  $\sigma_n^j$  – напряжения на наружной поверхности в конце интервала времени с номером «n»,  $\varphi_{i+1}^{(j)}$  – матрица преобразования,  $\Delta T_{n-i}$  – неизвестное линейное повышение температуры на участке разбиения интервала времени (n-i). Элементы матрицы  $\varphi_{i+1}$  являются напряжениями в конце промежутка времени  $t_{i+1}$ , вызванными единичным линейным повышением температуры внутренней поверхности в промежутке времени с номером (n-i-1, n-i).

Модельные испытания показали, что полученные результаты численного анализа близки к полученным экспериментально. Различие расчётных и экспериментальных данных для металлической модели, нагружаемой с стороны внутренней поверхности потоком теплоносителя с температурой 95°С, составляет 7-10% от определяемых величин, что соответствует заданной погрешности эксперимента.

1. Албагачиев А.Ю., Алексеева С.И., Ахметханов Р.С., и др. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин Ответственный редактор Мазутов Н.А., Москва, издательство "Книжный дом "ЛИБРОКОМ" 2019 – 576 с.

2. Разумовский И.А., Чернятин А.С., Фомин А.В. Развитие экспериментально-расчётных методов определения напряжённо-деформированного состояния элементов конструкций в ИМАШ //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013, №10. С. 87-94.

3. Маслов С.В. Исследование напряжённого состояния действующего оборудования методом тензометрии для уточнения условий прочности и ресурса//Машиностроение и инженерное образование. 2021. №3-4(67). С. 16-27. EDN: NFLARX

# Исследование несущей способности перспективной сетчатой конструкции беспилотного летательного аппарата

Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.

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

E-mail: vie03@mail.ru

## Цель

Мониторинг кинетики повреждений и оценки несущей способности с применением акустической эмиссии (АЭ) перспективной конструктивной силовой схемы (КСС) сетчатой модели крупноразмерного беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в ходе её стендовых испытаний на сжатие. Несмотря на высокие расчетные показатели прочности сетчатых конструкций, на практике предельная нагрузка может быть заметно ниже расчетной, что обусловлено недостатками технологического процесса их изготовления [1]. Под воздействием ударных нагрузок в зонах концентрации напряжений происходит быстрая деградация свойств композитного материала, сопровождаемая трещинообразованием его структуры, приводящей к радикальному (до 3 раз) снижению прочностных характеристик композитных конструкций. Численный анализ восприятия внешних усилий: растяжения, сжатия и сдвига типовыми фрагментами традиционной обшивочной и сетчатой КСС показал, что в рамках сетчатых структур внешние механические нагрузки на конструкцию воспринимаются преимущественно за счет продольного растяжения и сжатия ребер. Наличие в сетчатой структуре треугольников позволяет эффективно воспринимать сдвиговые усилия только за счет растяжения и сжатия ребер, образующих треугольник [2]. Объединение сетчатого каркаса с эластичными панелями позволило сформировать новый тип КСС планеров БПЛА, позволяющий решить основные проблемы статической и ударной прочности.

## Объект исследования и используемое оборудование

Объектом исследования являлась равнопрочная сетчатая панель перспективной КСС с габаритными размерами 800x920 мм. Обшивка соединена с ребрами жесткости КСС через резиновую прокладку клеевым способом. Для проведения АЭ диагностики панели применялась шестнадцатиканальная система A-Line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», РФ) и квазирезонансные преобразователи АЭ (ПАЭ) *R15 $\alpha$ -AST* фирмы Mistras (США). Нагрузке панели осуществлялось на стенде MTS в автоматическом режиме при скорости перемещения подвижной траверсы 1,25 мм/мин. В ходе первого нагружения панели максимальная нагрузка достигала  $P_{max}=-200$  кН, что составляло примерно 40-50 % от расчетной. Перед вторым нагружением в пяти узлах пересечения силовых ребер центральной части панель со стороны обшивки была подвержена ударному воздействию энергией в 50 Дж.

## Результаты исследований

В ходе повторного сжатия панели при повышении нагрузки до  $P=-237$  кН произошла потеря несущей способности, сопровождающаяся расслаиванием ребер жесткости в нижней опорной части панели. На рис. 1 представлены результаты АЭ диагностики панели, включающие координатную локацию источников АЭ (а), динамику изменения потоковых параметров парциальной активности (б) и весового содержания (в) локационных импульсов в *H*, *C*, *B* кластерах, а также снижение характеристик  $B_W$  несущей способности ПКМ.

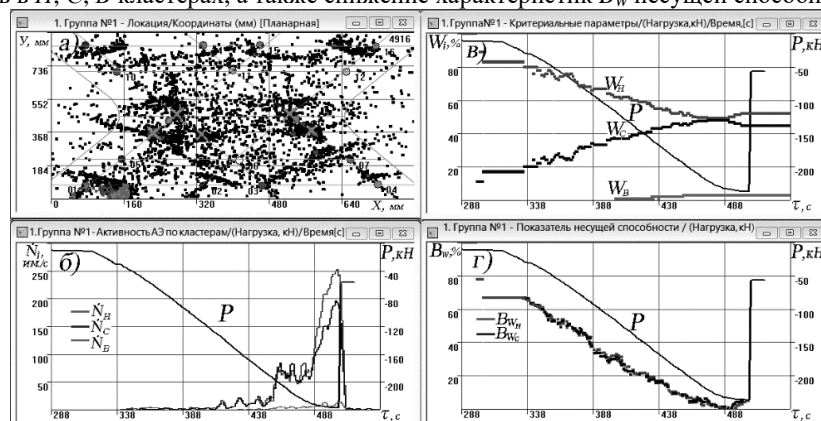


Рис. 1. Результаты АЭ диагностики повторного нагружения исследуемой панели, полученные при повышении уровня сжимающей нагрузки до  $P_B=-237$  кН

Повышение сжимающей нагрузки до предельного уровня  $P_B=-237$  кН происходило при пиковом росте активности в *H* и *C* кластерах (б), достигающей  $\dot{N}_H=250$  им./с,  $\dot{N}_C=200$  им./с. При этом уровень потокового параметра  $W_H$  составил 52 %,  $W_C=46$  %,  $W_B=2$  % (в), а характеристики несущей способности  $B_W$  снижались до нулевых значений (г).

## Заключение

Сопоставление результатов АЭ диагностики, полученной в ходе первого и повторного испытания панели при повышении уровня нагрузки до  $P=-200$  кН показало, что ударное воздействие вызвало практически двукратное снижение несущей способности КСС с  $B_W=35-40$  % до 20 % (рис. 1, г).

[1]. Матвиенко Ю.Г. и др. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 1. С. 69 – 81.

# Применением акустико-эмиссионной диагностики при испытаниях стрингеров на трехточечный изгиб

Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.

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

E-mail: vie03@mail.ru

## Цель

Мониторинг состояния полимерного композитного материала (ПКМ) в зонах действия максимальных сдвиговых напряжений является актуальной задачей технической диагностики авиационных конструкций. Основной проблемой при испытаниях образцов ПКМ на сдвиг является сложность их закрепления в захватах нагружающего устройства и создание разрушающих нагрузок в контролируемой области. Последнее обусловлено тем, что при высоком содержании армирующих волокон ПКМ имеет высокую прочность на разрыв, и на порядок меньшую на сдвиг, смятие, срез. Среди методов экспериментального определения характеристик сдвига самым распространенным является метод испытания на сдвиг при трехточечном изгибе или «метод короткой балки», который стандартизирован в отраслевом стандарте ОСТ 92-1472-78.

## Объект исследования и используемое оборудование

Объектом исследования являлись стрингеры опорных стоек, конструкция которых показана на рис. 1.

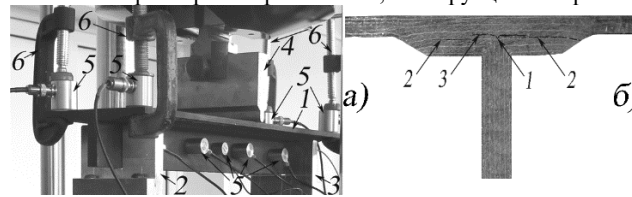


Рис. 1. Испытание стрингера на трехточечный изгиб (а) и трещины в полке стрингера, вызванные сдвиговыми напряжениями (б)

При испытаниях на трехточечный изгиб максимальные сдвиговые напряжения возникали вблизи нейтрального слоя опорной полки стрингера (рис. 1, б) в месте закладки уплотнительного жгута (поз. 1), от действия которых происходило его расслаивание, сопровождающееся образованием, как межслоевых (поз. 2), так и внутри слоевых трещин (поз. 3), и потерей несущей способности образцов. Для регистрации процессов накопления повреждений в зонах опор использовалась восьмиканальная акустико-эмиссионная система «А-line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», РФ). Испытание стрингеров на трехточечный изгиб выполнялось в 3-4 этапа, на которых уровень сжимающего усилия к нагружаемому клину постепенно повышался на 20 кН, после чего в течение 60 с выполнялась выдержка и нагрузка снималась. При повышении усилия до  $P=(60-80)$  кН сдвиговые напряжения вызывали расслаивание стрингеров, что сопровождалось потерей их несущей способности.

## Результаты исследований

На рис. 2 приведены результаты АЭ диагностики при испытании на трехточечный изгиб стрингера, потеря несущей способности которого произошла на 26 с выдержки на третьем этапе испытания при  $P=60$  кН. Распределение плотности источников АЭ в области локации, которая в зоне опор превышала 50 ед./см<sup>2</sup>, показано на рис. 4.28, а. Всего в течение трех этапов нагружения было зарегистрировано  $N_{\Sigma} = 3568$  АЭ событий.

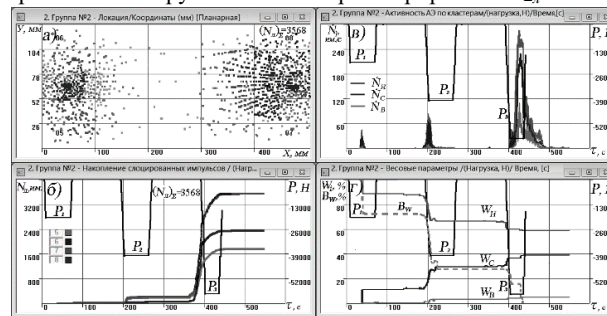


Рис. 2. Результаты АЭ диагностики стрингера, зарегистрированные в течение трех этапов испытаний на трехточечный изгиб

Если на первом этапе нагружения стрингера уровень потоковых параметров  $W_i$  в  $H, C, B$  кластерах составлял соответственно:  $W_H = 88\%$  и  $W_C = 11\%$ ,  $W_B = 1\%$ , на втором:  $W_H = 67\%$ ,  $W_C = 29\%$ ,  $W_B = 3\%$ , то на третьем при потере устойчивости они достигали пороговых значений:  $[W_H] = 58\%$ ,  $[W_C] = 38\%$ ,  $[W_B] = 4\%$  (рис.2, з). Пунктирной линией на рис. 2, з с обозначением  $BW$  показано изменение несущей способности от действия сдвиговых напряжений в области нейтрального слоя полки стрингера № 2 на этапах его испытания на трехточечный изгиб, которая снижалась от 72 % до нулевых значений при повышении уровня  $P$  до 60 кН.

## Заключение

Разработанная методология проведения АЭ диагностики [1] позволила контролировать кинетику микро, мезо и макроповреждений в структуре материала стрингера от действия сдвиговых напряжений в зонах опор, сопровождаемую снижением его несущей способности с  $BW = 72\%$  до нулевых значений при повышении уровня изгибающей нагрузки от  $j = (P_j/P_B)$  от 33 % (20 кН) до 100 % (60 кН).

[1]. Матвиенко Ю.Г. и др. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 1. С. 69 – 81.

## Структурно-феноменологическая концепция и акустико-эмиссионный мониторинг несущей способности изделий

Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.

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

E-mail: vie03@mail.ru

С целью мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности конструкций в режиме их нагружения разработана структурно-феноменологическая концепция (СФК) и модель эволюции разрушения твердого тела, которая связывает потерю несущей способности с перераспределением микро, мезо и макроповреждений в структуре конструкционного материала. На рис. 1, а показана кинетика перераспределения весового содержания микро ( $D_H$ ), мезо ( $D_C$ ) и макроповреждений ( $D_B$ ) в структуре материала, отражающая эволюцию разрушения твердого тела на стадиях упругого ( $\tau_0$ ), неупругого ( $\tau_1$ ) и предельного нагружения ( $\tau_2$ ).

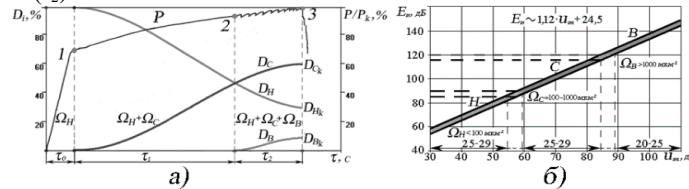


Рис. 1. Динамика парциального изменения повреждений ( $d_i/d_\Sigma$ ) в структуре конструкционного материала на микро ( $d_H$ ), мезо ( $d_C$ ) и макроуровне ( $d_B$ ) в процессе возрастания нагрузки  $P$  по отношению к предельному значению  $P_k$  (а), и разделение импульсов АЭ, соответствующих микро- ( $\Omega_H$ ), мезо- ( $\Omega_C$ ) и макро-повреждениям ( $\Omega_B$ ), на кластеры нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) энергетического уровня в поле параметров относительной энергии  $E_n$  и амплитуды  $u_m$  (б)

СФК предполагает, что на стадии упругого деформирования в материале возникают только рассеянные микроповреждения, весовое содержание которых составляет  $D_H=100\%$ , а поверхность их разрушения по не превышает  $\Omega_H < 100 \text{ мкм}^2$ . При повышении нагрузки локальные микроповреждения на стадии неупругого деформирования материала в результате эволюции достигают мезомасштабного уровня  $\Omega_C=100-1000 \text{ мкм}^2$ , что сопровождается снижением параметра  $D_H$  и ростом параметра  $D_C$ . На стадии предельных деформаций, локальные мезоповреждения достигают макромасштабного уровня  $\Omega_B > 1000 \text{ мкм}^2$ . При этом происходит дальнейшее снижением параметра  $D_H$  и рост параметров  $D_C$  и  $D_B$ , которые при достижении пороговых значений  $D_{ki}$  вызовут разрушение материала. С целью мониторинга процесса накопления микро-, мезо- и макроповреждений в структуре конструкционного материала предложено регистрируемые локационные импульсы разделять на кластеры нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) энергетического уровня. На рис. 2, б приведены границы этих кластеров в поле параметров относительной энергии и максимальной амплитуды импульсов ( $E_n-u_m$ ), соответствующие микро-, мезо- и макро-повреждениям в структуре связей с поверхностью разрушения  $\Omega_H < 100 \text{ мкм}^2$ ,  $\Omega_C=100-1000 \text{ мкм}^2$ ,  $\Omega_B > 1000 \text{ мкм}^2$ . Для мониторинга микро-, мезо- и макроповреждений в структуре материала используют потоковые параметры ( $W_i$ ) весового содержания локационных импульсов в H, C, B кластерах:

$$W_H = (N_H/N_\Sigma) \cdot 100\%, \quad W_C = (N_C/N_\Sigma) \cdot 100\%, \quad W_B = (N_B/N_\Sigma) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $N_H, N_C, N_B$  – парциальные значения локационных импульсов в нижнем, среднем и верхнем кластерах.

Регистрируя при нагружении изделия перераспределение весового содержания микро, мезо и макроповреждений и сопоставляя их с пороговыми значениями  $[W_i]$ , можно контролировать текущий уровень несущей способности изделия, используя следующие алгоритмы:

$$B_{W_H} = \frac{W_H - [W_H]}{(W_H)_{\max} - [W_H]} \cdot 100\%; \quad B_{W_C} = \frac{[W_C] - W_C}{[W_C] - (W_C)_{\min}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$(W_H)_{\max}, (W_C)_{\min}$  – экстремальные значения параметров, регистрируемые в энергетических кластерах при переходе от рассеянного на стадии  $\tau_0$  к локальному накоплению повреждений на стадии  $\tau_1$  [1]. На рис. 2, а представлена динамика весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах, отражающая процесс перераспределения микро, мезо, макроповреждений  $D_i$  в процессе деформирования конструкционного материала (рис. 1, а), а на рис. 2, б графики падения несущей его способности ( $B_{W_H}$  и  $B_{W_C}$ ), получаемые в режиме нагружения изделия, сопоставлением текущих и пороговых значений потоковых параметров  $W_i$  локационных импульсов в H, C, B кластерах при разрушении материала.

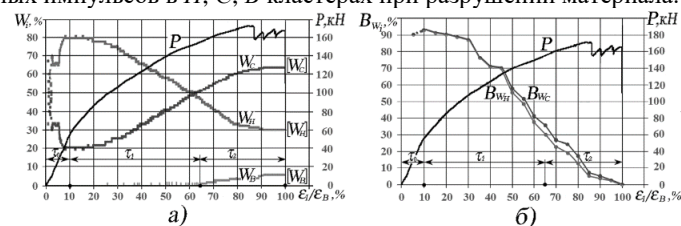


Рис. 2. Динамика изменения параметров  $W_i$  в H, C, B кластерах при повышении уровня  $j=\varepsilon_i/\varepsilon_B$  от 5 до 100 % (а), графики характеристик  $B_{W_H}$  и  $B_{W_C}$  несущей способности (б), построенные по алгоритмам (1) и (2) сопоставлением текущих и пороговых значений  $[W_i]$

[1]. Матвиенко Ю.Г. и др. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 1. С. 69 – 81.

# Диагностика консоли крыла планера мс–21 в зоне ударного воздействия с применением акустической эмиссии

Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.

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

E-mail: vie03@mail.ru

## Цель

Мониторинг кинетики повреждений и оценки несущей способности с применением акустической эмиссии (АЭ) кессона крыла самолёта МС-21-300 в ходе проведения ресурсных испытаний. Исследования выполнялись в зоне искусственного повреждения нижней панели в области люка-лаза, расположенного между второй и третьей нервюрой кессона, после наработки более половины проектного ресурса на стенде повторно-статических испытаний. В процессе АЭ диагностики было выявлено три зоны развивающихся повреждений композитного материала в нижней панели кессона, две из которых находились по границам области ударного воздействия, а третья вблизи от кромки технологического окна.

## Объект исследования, силовая схема и программа нагружения

На стенде повторно-статических испытаний ФАУ «ЦАГИ» выполнялось нагружение кессона крыла МС-21-300 в соответствии с программой ресурсных испытаний. Имитация аэродинамических и инерционных нагрузок на консоль крыла осуществляется при помощи гидроцилиндров, которые создают усилия в режиме уборки-выпуска штоков. Равноплечая система связей позволяла создавать тянуще-толкающие усилия на лонжерон по трем направлениям «X», «Y» и «Z», вызывая изгибающие и крутящие моменты сил относительно осей центроплана. Нагружение осуществляли блоками переменных нагрузок, включающих семь полётных режимов, имитирующих руление на взлетной полосе, взлет, набор высоты, крейсерский полет, снижение, посадку, пробег. Причем в процессе АЭ диагностики исследуемой консоли крыла применялись только режимы D и E [1], при которых уровень нагрузки не превышал 30 % от максимально допустимых.

## Результаты исследования

Исследование кессона с применением АЭ диагностики проводили в зоне ударного воздействия нижней панели в области люка-лаза, расположенного между второй и третьей нервюрой (рис. 1), после 31070 имитационных полетов. Результаты локации источников АЭ, зарегистрированные в ходе 16 лабораторных полётных циклов с номера 31071 по 31086, в области люка-лаза нижней панели между второй и третьей нервюрой кессона, приведены на рис. 1.

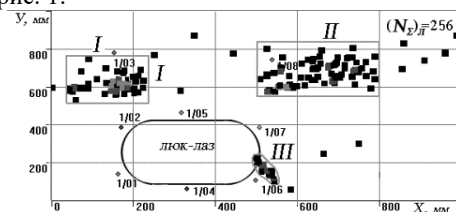


Рис. 1. Результаты локации источников АЭ, зарегистрированные в течение 16 лабораторных полётных циклов в области люка-лаза нижней панели между второй и третьей нервюрой кессона

На графиках рис. 2 отображена динамика изменения потоковых параметров  $W_i$  весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах, отражающая кинетику нарушения структурных связей и снижение несущей способности  $B_W$  композитного материала в зонах I – III нижней панели кессона [1].

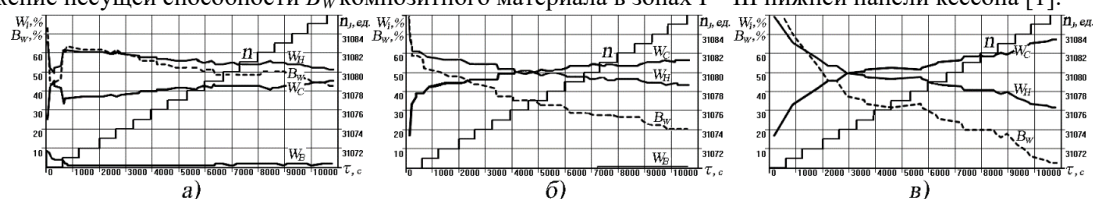


Рис. 2. Изменение потоковых параметров  $W_i$  локационных импульсов в энергетических кластерах и снижение несущей способности материала, контролируемое в I зоне (а), II (б) и III зоне (в) накопления источников АЭ в течение 16 лабораторных полётов

Графики падения несущей способности материала  $B_W$ , отмеченные на рис. 2 пунктирными линиями, в течение 31071, ..., 31086 лабораторных полётов заметно отличалось. Если в зоне I уровень параметра  $B_W$  снижался с 63 до 43 %, а в зоне II с 58 до 20 %, то в зоне III справа от кромки люка-лаза падение структурной устойчивости материала достигало 70 %, что свидетельствует об интенсивности эволюционных процессов.

## Заключение

Применение разработанной методологии [2] мониторинга динамики изменения потоковых параметров  $W_i$  весового содержания локационных импульсов в нижнем, среднем и верхнем энергетических кластерах позволило не только контролировать кинетику микро, мезо и макроповреждений в режиме нагружения кессона, но и оценивать несущую способность материала конструкции в зонах локации источников АЭ.

[1]. Матвиенко Ю.Г. и др. Диагностика с помощью акустической эмиссии консоли крыла планера МС-21 в зоне искусственных повреждений при ресурсных испытаниях конструкции // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 8. С. 675-685.

[2]. Матвиенко Ю.Г. и др. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 1. С. 69 – 81.

# Оценка погрешности применения стандартного алгоритма планарной локации источников акустической эмиссии

Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Баландин Т.Д.  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
E-mail: chernovdv@inbox.ru

## Цель

Определение возможности применения стандартного алгоритма планарной локации источников акустической эмиссии (АЭ) при пороговом методе регистрации импульсов преобразователями антенной решетки. Возможность применения стандартного алгоритма оценивалась по результатам расчета относительной погрешности. Расчет погрешности осуществлялся по среднеквадратичному отклонению координат с индикацией относительно фактического местоположения источника АЭ ( $\delta = \sqrt{(\delta X)^2 + (\delta Y)^2}$ , где  $\delta$  – относительная погрешность стандартного алгоритма планарной локации,  $\delta X$  и  $\delta Y$  – относительные значения погрешностей расчета индикаций, зарегистрированные по осям  $X$  и  $Y$  соответственно).

## Объект исследования и используемое оборудование

Исследования проводились на прямоугольной пластине размером 990x510x6 мм из полимерного композиционного материала (ПКМ). В качестве источника импульсов АЭ использовался преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ) *R15 $\alpha$ -SMA* фирмы «Mistras» (США), подключенный к генератору сигналов специальной формы *GW Instek MFG-72120MA* фирмы «Good Will Instrument Co.» (Тайвань). Для имитации акустических сигналов различной амплитуды на возбуждающий канал генератора подавался прямоугольный импульс, максимальная амплитуда которого изменялась в диапазоне 100 мВ – 10 В, что позволило зарегистрировать импульсы АЭ амплитудой  $u_m = 45$ –80 дБ. Регистрация импульсов АЭ осуществлялась с помощью квазирезонансных ПАЭ *R15 $\alpha$ -SMA*, подключенных к измерительному каналу АЭ системы *A-Line-32D* фирмы «Интерюнис-ИТ» (Россия) через блок предварительного усиления. Измерительные преобразователи устанавливались на поверхность пластины из ПКМ через слой контактной смазки таким способом, чтобы расстояние между соседними элементами антенной решетки составляло 500 мм.

## Результаты исследований

На начальном этапе проведения экспериментальных исследований проведена серия предварительных испытаний по расчету скорости распространения импульсов АЭ ( $V_g$ ) амплитудой  $u_m = 45$ –80 дБ [1]. По результатам проведения предварительных испытаний определена корреляционная зависимость между значениями скорости и амплитудой регистрируемых сигналов (рис. 1а). Среднее значение скорости было выбрано равным  $V_g = 5950$  м/с. Расчет индикаций планарной локации осуществлялся по значениям разности времен регистрации (РВР) импульсов АЭ преобразователями антенной решетки, где  $\Delta t_{1-2}$ ,  $\Delta t_{2-3}$  и  $\Delta t_{1-3}$  – значения РВР, зарегистрированные парами ПАЭ № 1-2, № 2-3 и № 1-3 соответственно. Результат применения стандартного алгоритма планарной локации представлен на рисунке 1б.

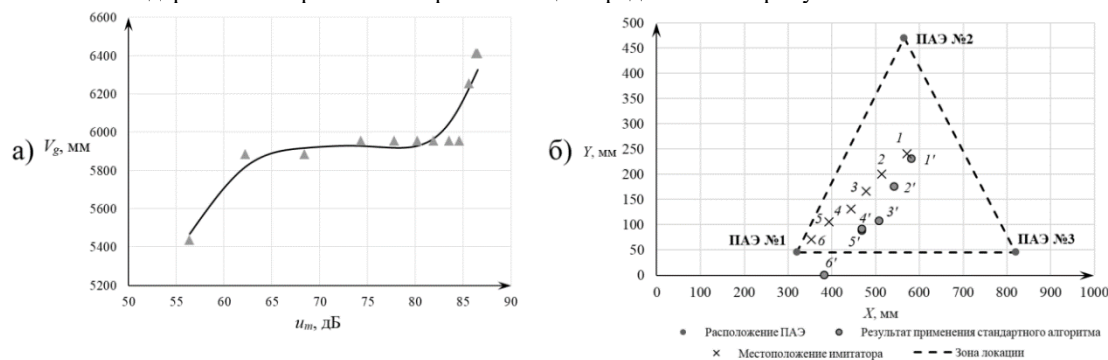


Рис. 1. Результаты (а) построения зависимости скорости распространения импульсов АЭ от амплитуды регистрируемых сигналов и (б) расчета координат источников АЭ событий с помощью стандартного алгоритма планарной локации

## Заключение

По результатам обработки экспериментальных данных были определены возможности применения стандартного алгоритма планарной локации. Минимальная относительная погрешность стандартного алгоритма, равная 4 %, была зарегистрирована при имитации высокоамплитудных ( $u_m \geq 70$  дБ) акустических сигналов в координате (574; 240) мм. Максимальное значение относительной погрешности, равное 41 % было зарегистрировано в координате (355; 70) мм при имитации импульсов АЭ амплитудой  $u_m = 45$  дБ. Полученные результаты будут использованы для создания нового алгоритма планарной локации, инвариантной к местоположению источника акустических сигналов и амплитуде регистрируемых импульсов АЭ. Таким образом, для достоверного построения планарной локации с помощью стандартного алгоритма максимальное расстояние между соседними элементами антенной решетки не должно превышать 250 мм. [1] Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Проблемы локации источников акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2021. № 9. С. 35-44.

## Обоснование допустимости изменения объемов и периодичности эксплуатационного неразрушающего контроля оборудования и трубопроводов второго контура АЭС с РУ ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

<sup>1</sup>Матвиенко Ю.Г., <sup>2</sup>Кузьмин Д.А.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

E-mail: ygmatvienko@gmail.com

<sup>2</sup>АО «ВНИИАЭС», Москва, Россия

Основные предпосылки к указанной работе возникли в результате выпуска новых Федеральных Норм и Правил в атомной энергетике НП-084-15, которые содержит правовую возможность перехода на периодичность до 10 лет в проектом сроке эксплуатации атомной станции и позволяют использовать риск-ориентированный подход при выборе объемов и периодичности неразрушающего контроля металла: 1) не существует технологий на создание оборудования и трубопроводов с отсутствием несплошностей (дефектов); 2) методы и средства неразрушающего контроля металла, применяемые на АЭС, а также в других отраслях техники обладают выявляемостью меньше чем 100%; 3) несплошности в процессе эксплуатации могут достигать до размеров дефектов; 4) при увеличении периодичности с 4-х до 10 лет, у несплошности будет в 2,5 раза больше времени на бесконтрольное развитие; 5) использование риск-ориентированного подхода в мировой практике.

Целью работы является безопасный переход на десятилетнюю периодичность с ключевыми показателями: 1) уменьшение времени на проведение среднегодового планово-предупредительного ремонта; 2) увеличение КИУМ – коэффициент использования установленной мощности; 3) использование возможностей Федеральных Норм и Правил с переводом с 4(6) до 10 лет. АО «Концерн Росэнергоатом» организовало работу с командой, которая позволила получить положительный результат: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», АО «ВНИИАЭС», АО «Атомэнергопроект», ИМАШ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ФБУ «НТЦ ЯРБ» и другие организации. Работа была разделена на две части посвященных первому и второму контуру АЭС с РУ типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Разработку методики возглавил по первому контуру АЭС с РУ типа ВВЭР АО ОКБ «Гидропресс», а по второму контуру – АО «ВНИИАЭС».

Для решения поставленной задачи был проведен сбор исходных данных несплошностях (дефектах) на АЭС за последние 15 лет эксплуатации, где с учетом возможностей методов неразрушающего контроля металла были получены вероятностные кривые постулируемой дефектности для основного оборудования АЭС. На основании результатов вероятного анализа безопасности были получены последствия при отказе (разрушении зоны контроля) рассматриваемого оборудования. На основе собранных данных по дефектности и учету требований нормативных документов была разработана, совместно с ИМАШ РАН и согласована с ФБУ «НТЦ ЯРБ» Методика «Обеспечение безопасности при переходе с 4 на 10-летнюю периодичность ремонтного цикла АЭС с РУ типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200» для внедрения и тиражирования на АЭС типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 от 24.06.2021 № МТ 1.1.4.02.001.1803-2021. Методика введена в действие и внедрена для применения на АЭС типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в проектом сроке эксплуатации приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 28.09.2021 № 9/01/1526-П и включена в список документов, регламентирующих обеспечение безопасности на всех этапах жизненного цикла атомных станций (обязательных и рекомендуемых к использованию) АО «Концерн Росэнергоатом». Методика содержит требования, область применения и порядок расчета для определения объемов и периодичности оборудования и трубопроводов АЭС для второго контура, подверженных механизму усталости и механизму деградации эрозивно-коррозионного износа. Указанные механизмы деградации являются доминирующими и приводящими к разрушению оборудования и трубопроводы второго контура АЭС с РУ типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Методика позволяет учитывать постулируемую дефектность характерную для рассматриваемого оборудования, рост дефекта (или утонения) в процессе эксплуатации и риск-ориентированный подход. Вероятность разрушения описывается следующим уравнением:  $P = f(\vec{x})$ :

$$\vec{x} = \{t, x, y, Q, x_*, y_*, A, A_{xy}, n, k, \rho, C, m, R, N, \dots\}, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $x, y$  – геометрические размеры несплошностей;  $Q$  – вероятность пропуска дефекта металла;  $x_*, y_*$  – максимальный размер параметра, характеризующий размер несплошности, мм;  $x_0, y_0$  – чувствительность метода контроля, мм;  $A, A_{xy}, n$  – коэффициенты дефектности на основе фактических данных с АЭС;  $k$  – количество проведенных неразрушающих контролей;  $\rho$  – коэффициент, который характеризует процентное ограничение при выявляемости дефектов с увеличением количества контролей на одну зону контроля, выраженный в долях единицы;  $N$  – число циклов нагружения;  $C, m$  – коэффициенты, зависящие от материала и условий эксплуатации;  $R$  – коэффициент асимметрии цикла и другие.

Технический риск определяется по НП-084-15 как:  $R(t) = P(t) \cdot C$ , где  $P$  – вероятность обнаружения дефекта;  $C$  – последствия разрушения зоны контроля. Результат работы позволяют уменьшить время на проведение среднегодового планово-предупредительного ремонта до 30%, увеличить коэффициент использования установленной мощности до 7%, а экономический эффект при внедрении на 1 блоке дадут прибыль около 1 млрд. руб. за счет дополнительной выработки электроэнергии при 7% увеличении КИУМ. По результатам работ было исследовано более 4000 случаев повреждения металла на 309 подсистемах. Для АЭС с ВВЭР-1200 возможен перевод на увеличенную периодичность до 10 лет **84,2%** подсистем, а для АЭС с ВВЭР-1000 – **54,6%** подсистем.



# Мониторинг деформированного состояния материала конструкционных сталей по потоковым параметрам локационных импульсов в режиме нагружения изделий

Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
E-mail: vie03@mail.ru

## Цель

Разработка методики мониторинга степени деформирования конструкционных сталей в процессе АЭ диагностики с применением наиболее информативных потоковых параметров регистрируемых импульсов. Совместное применение методов цифровой обработки сигналов и статистического анализа позволило разделить поток импульсов АЭ на три характерных кластера, формируемые импульсами локации источников АЭ, и регистрируемыми на стадиях упругой, неупругой и предельной деформации.

## Объект исследования и используемое оборудование

Исследования проводились в ходе испытания на разрыв образцов из стали 30ХГСА, имеющих габаритные размеры 400x20x6 мм. Испытания на разрыв образцов проводились при скорости перемещения подвижной траверсы стенда 2 мм/мин. Контроль кинетики повреждений в области шейки осуществляли с применением АЭ диагностики, используя преобразователи VS150-RIC (фирмы «Vallen», ФРГ) и систему «Vallen AMSY-6» (ФРГ), имеющую следующие настройки: порог дискриминации сигналов  $u_{th}=36$  дБ, полосу пропускания цифровых фильтров  $\Delta f=95-850$  кГц, расчетную групповую скорость  $V_g=3,3$  мм/мкс.

## Результаты исследований

В качестве потоковых параметров, коррелирующих со степенью деформирования образцов из стали 30ХГСА при испытаниях на разрыв, были использованы значения квантиля уровня  $p = 0,8$  для потоковых параметров удельной энергии сигналов ( $[E_n/N_n]_{p=0,8}$ ) и усредненной частоты их осцилляций ( $[N_n/\tau_n]_{p=0,8}$ ) [1]. Используемые потоковые параметры отражают физику процессов деформирования структурных связей конструкционной стали 30ХГСА на стадиях упругого, неупругого и предельного состояния материала. Как следует из рис. 1, селекция сигналов в поле дескрипторов  $E_n/N_n - N_n/\tau_n$  позволяет разделить регистрируемые импульсы на три характерных кластера, формируемых в результате повреждения структурных связей на стадиях  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$ , соответствующих упругим, неупругим и предельным деформациям.

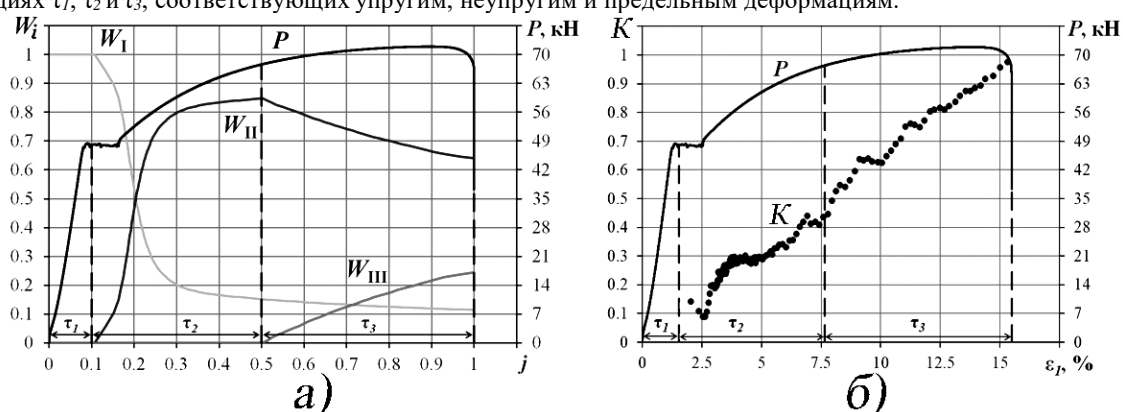


Рис. 1. Изменение весового содержания потоковых параметров  $W_i$  ( $W_I$ ,  $W_{II}$  и  $W_{III}$ ) в кластерах I – III, зарегистрированных в процессе деформирования стального образца при повышении уровня  $j = \epsilon_i/\epsilon_B$  от 0 до 1 (а), расчетной зависимости  $K(\epsilon_i)$  для оценки степени деформирования конструкционной стали 30ХГСА в процессе нагружения (б)

Для выполнения расчетной оценки степени деформирования стали 30ХГСА разработан алгоритм:

$$\begin{cases} K = 0,02 \cdot W_I + 0,32 \cdot W_{II} + 1,88 \cdot W_{III} - 1,58 \\ W_I + W_{II} + W_{III} = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

согласно которому расчёт критерия  $K(\epsilon_i)$  выполняется на основании текущих значений потоковых параметров  $W_i$  ( $W_I$ ,  $W_{II}$  и  $W_{III}$ ) весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах I, II, III (рис.1). На рис. 1, б представлен результат применения расчетной зависимости  $K(\epsilon_i)$  для оценки степени деформирования стали 30ХГСА ( $j = \epsilon_i/\epsilon_B$ ) в режиме нагружения образца по потоковым параметрам  $W_i$ .

## Заключение

Расчетный алгоритм оценки уровня  $K(\epsilon_i)$ , разработанный на основании регрессионной модели обработки потоковых параметров  $W_i$  позволил контролировать степень деформирования конструкционной стали 30ХГСА при повышении уровня деформации  $\epsilon_i$  от 2,5 до 15 % с погрешностью не большей 7 %.

Корректность проведенной оценки подтверждается высоким уровнем коэффициента корреляции  $r = 0,97$  в интервале значений  $j$  от 0,15 до 0,97.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00769-П).

[1]. Марченков Ю.А, Васильев И.Е., Чернов Д.А. и др. Разработка эмпирической модели расчета степени поврежденности стальных образцов по результатам статистической обработки потока импульсов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2023. № 9. С. 18-26.

# Изучение возможностей применения и вибродиагностики для мониторинга состояния конструкционного материала в процессе его структурной перестройки

Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Скворцов Д.Ф.

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

E-mail: vie03@mail.ru

## Цель

Изучение возможности использования вибродиагностики для мониторинга состояния конструкционного материала в процессе его структурной перестройки в диапазоне звуковых волн от 20 Гц до 20 кГц.

## Объект исследования и используемое оборудование

Исследования проводились в ходе испытания на разрыв образцов корсетной формы из Ст.3 с габаритными размерами в зоне контроля 250x40x4 мм, имеющих центральное отверстие диаметром 5 мм. Для регистрации низкочастотных импульсов были использованы система вибродиагностики *Оникс* (ООО «Диамех-2000», РФ) и программно-аппаратурный комплекс для оценки акустических параметров *Эксперт М-19.2022*. В качестве приемников регистрации низкочастотных колебаний в системе *Оникс* использовались акселерометры *АС102-1А*, а в программно-аппаратурном комплексе *Эксперт М-19.2022* микрофон с намагниченным стальным основанием, подключенный к звуковой плате ноутбука. Для верификации регистрируемых импульсов смещения среды в процессе структурной перестройки стальных образцов применялась восьмиканальная система *A-line32D* (ООО «Интерюнис-ИТ», РФ) и квазирезонансные преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) *R15α-AST* (фирмы «Mistras», США). Испытания образцов проводились на разрывной машине *MTS-50* (фирма «MTS», США) при скорости перемещения верхней траверсы 2 мм/мин. Нагружение образцов выполнялось по мягкой схеме при контролируемом уровне нагрузки. ПАЭ, микрофон с магнитным основанием и один из акселерометров устанавливались на поверхности образцов вблизи от центрального отверстия (места разрыва), другой акселерометр крепился непосредственно к верхней траверсе станда через слой смазки и магнитную насадку. Порог дискриминации сигналов АЭ аппаратуры составлял 36 дБ, полоса пропускания цифровых фильтров 30-500 кГц.

## Результаты исследований

В процессе постепенного повышения растягивающей нагрузки ПАЭ регистрировали сигналы АЭ, начиная от стадии упругого деформирования материала (рассеянные концентраторы), локализации источников АЭ в зоне концентратора (центрального отверстия), пластического деформирования и разрыва образцов. Акселерометры регистрировали сигналы смещения среды только при разрыве образцов, т.е. в результате волновых процессов, возникающих в период последствия [1]. Перспективный программно-аппаратурный комплекс для оценки акустических параметров *Эксперт М-19.2022* в связи с низкой чувствительностью микрофона, присоединенного к звуковой плате ноутбука, каких-либо сигналов в процессе испытания образцов из стали Ст.3 на разрыв не регистрировал. На рис. 1, а показано накопление сигналов локации источников АЭ каналами системы *A-line32D*, а на рис. 1, б сигнал, зарегистрированный акселерометром *АС102-1А* при разрушении образца.

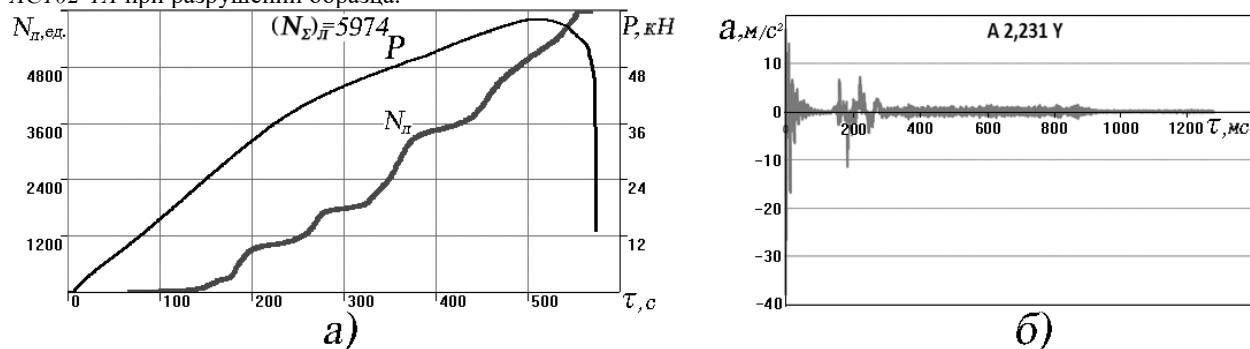


Рис. 1. Накопление локационных импульсов АЭ системой (а) при испытаниях образца на разрыв и регистрация смещения среды при разрушении датчиком вибродиагностики (б)

## Заключение

Проведенные исследования показали, что чувствительность датчиков вибродиагностики и программно-аппаратурного комплекса оценки акустических параметров сигналов *Эксперт М-19.2022* недостаточна для регистрации динамической перестройки структуры материала в процессе его деформирования. Как следует из рис. 1, если в процессе испытания стального образца на разрыв система *A-line32D* зарегистрировала 5974 импульсов локации источников сигналов, то система вибродиагностики *Оникс* с использованием наиболее чувствительных акселерометров *АС102-1А* фиксировала только один импульс смещения среды, вызванный разрывом образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00769-П).

[1]. Махутов Н.А. и др. Мониторинг разрушения волокон композитных материалов с применением системы акустической эмиссии, виброанализатора и высокоскоростной видеосъемки // Дефектоскопия 2020. № 12. С. 15-23.

# Риск-ориентированный подход к обеспечению безопасности и защищенности эксплуатации высоконагруженных машин

Махутов Н.А., Гаденин М.М.

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

E-mail: kei51@mail.ru

Результаты исследований прочности, ресурса и живучести являются базовой составляющей механики катастроф и рисков, новых принципов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию машин и позволяющих научно обоснованно предотвращать возникновение аварийных и катастрофических ситуаций, а также осуществлять продление ресурса безопасной эксплуатации [1-3]. Для оценки рисков  $R(\tau)$  наиболее признанными являются методы учета вероятностей возникновения опасных ситуаций  $P(\tau)$  и сопутствующих им ущербов  $U(\tau)$  -  $R(\tau) = F_R\{P(\tau), U(\tau)\}$ , где  $F_R$  - функционал параметров риска.

Основным направлением анализа и обеспечения безопасности и защищенности машин от неблагоприятных ситуаций является реализация требований к их работоспособности в этих условиях (рис. 1). Новым направлением для обеспечения защищенности рассматриваемых объектов является именно то направление, которое изначально формирует уровень защищенности объекта  $Z_R(\tau)$ . И этот уровень определяет все основные группы требований: безопасности  $S(\tau)$  и рисков  $R(\tau)$ , ресурса  $R_{Nz}(\tau)$ , надежности  $P_{PR}(\tau)$ , живучести  $L_{ld}(\tau)$ ; прочности  $R_c(\tau)$ , жесткости  $R_j(\tau)$ , устойчивости  $R_u(\tau)$ . С учетом такого подхода защищенность  $Z(\tau)$  рассматриваемых объектов можно оценить как  $Z(\tau) = 1 - R(\tau)/[R(\tau)]$ , где  $[R(\tau)] = R_k(\tau)/n_R$  - уровень приемлемых рисков, а  $n_R$  запас по рискам ( $n_R \geq 1$ ).



Рис. 1. Традиционный и новый алгоритмы определения и обеспечения защищенности высоконагруженных машин

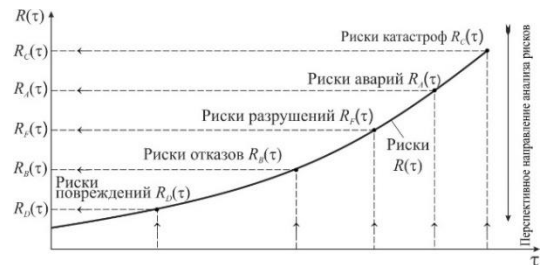


Рис. 2. Риски опасных состояний объектов и определяющие их параметры

Отказам соответствует образование локального разрушения в объекте. Дальнейшая его эксплуатация может сопровождаться локальными или полными разрушениями не критических элементов. Возникающие затем разрушения ведут к аварийным ситуациям. В наиболее опасных случаях аварийные ситуации переходят в катастрофические с полным разрушением объектов, гибелью персонала и повреждением природной среды. Риски катастроф определяют при этом критические риски  $R_c(\tau)$ .



Рис. 3. Структура анализа условий достижения предельных состояний

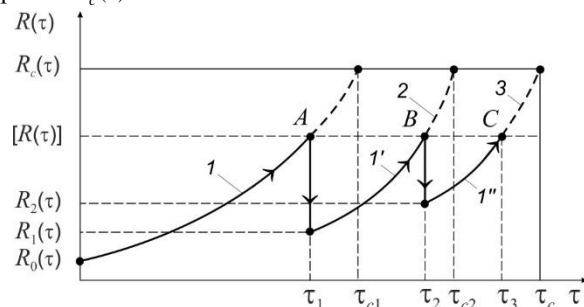


Рис. 4. Диаграмма изменения рисков при продлении ресурса безопасной эксплуатации

Проведение расчетов прочности и ресурса с оценкой условий достижения предельного состояния (рис. 3) и рисков (рис. 4) позволяет осуществлять продление ресурса анализируемых высоконагруженных машин на временах  $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3$  при сохранении для них уровней приемлемых рисков  $[R(\tau)]$ .

Таким образом, использование критериев риска, в состав ключевых параметров которых входят параметры прочности и ресурса, позволяет применять их в качестве комплексного риск-ориентированного подхода как к обеспечению безопасности и защищенности машин и конструкций, а также управлять уровнями эксплуатационных рисков с их снижением до приемлемых на всех стадиях жизненного цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00769).

[1]. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ и обеспечение защищенности от чрезвычайных ситуаций. Научный руководитель чл.-корр. РАН Махутов Н. А. - М.: МГОФ «Знание», 2021. - 500 с.

[2]. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Комплексная оценка прочности, ресурса, живучести и безопасности машин в сложных условиях нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020, №4 С.24-34.

[3]. Исследования и обоснование прочности и безопасности машин. / Под. ред. Н.А.Махутова, Ю.Г.Матвиенко, А.Н.Романова. К 300-

летию Российской академии наук, 85-летию Института машиноведения РАН. – М.: МГОФ «Знание», 2023. – 832 с.

# Разработка методологии мониторинга вязких и хрупких разрушений структурных связей в процессе деформирования конструкционных сталей и сплавов

Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
E-mail: vie03@mail.ru

## Цель

Разработка способа разделения с применением метода акустической эмиссии (АЭ) в процессе деформирования изделий повреждений, вызванных вязким и хрупким разрушением структурных связей в конструкционных сталях и сплавах. Хрупкие, вызванные сколом, и вязкие соответственно сдвигом механизмы разрушения структуры металла прежде всего отличаются скоростью и длительностью происходящих процессов. Так скорость хрупкого разрушения может быть сопоставима со скоростью звука в металле. Вязкое разрушение структурных связей происходит при значительных сдвиговых деформациях, большой затрате энергии на зарождение трещины и медленном её подрастании, что обуславливает меньшую скорость происходящих процессов. Причем для большинства высокопрочных конструкционных сталей характерен смешанный тип разрушения, когда на стадиях эволюции хрупкие разрушения сменяются вязкими или они происходят параллельно, как это наблюдается на стадиях упрочнения и предельного состояния высокопрочных сталей [1-2].

## Объект исследования и используемое оборудование

Исследования проводились в ходе испытания на разрыв образцов из стали 20ХН2МА с центральным V-образным надрезом, глубиной 3,3 мм, имеющих габаритные размеры 300x20x6 мм. Испытания на разрыв образцов проводились при скорости перемещения подвижной траверсы 1 мм/мин. В процессе нагружения контроль кинетики повреждений в зоне надреза осуществляли с применением АЭ диагностики, используя преобразователи R15 $\alpha$ -AST (фирмы «Mistras», США) и систему A-Line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», РФ), имеющую следующие настройки: порог дискриминации сигналов  $u_{th}=40$  дБ, полоса пропускания цифровых фильтров  $\Delta f=100-300$  кГц, расчетная групповая скорость распространения АЭ импульсов  $V_g=2,9$  мм/мкс.

## Результаты исследований

Для решения указанных проблем было предложено использовать дескриптор  $u_m/N_u$ , отображающий крутизну спада амплитуды ( $u_m$ ) или тангенс угла наклона на фазе затухания сигнала, характеризующую количеством его осцилляций ( $N_u$ ). Для определение порогового уровня параметра  $u_m/N_u$ , разделяющих поток регистрируемых импульсов на два, генерируемых вязкими ( $u_m/N_u < 9,5$  мкВ/ед.) и хрупкими повреждениями ( $u_m/N_u > 9,5$  мкВ/ед.), на рис. 1 сопоставлены формы сигналов (а, в) и соответствующие им спектрограммы Чои-Вильямса (б, г) импульсов (1) и (2), генерированных структурными преобразованиями от действия сдвиговых и нормальных мод напряжений, имеющих одинаковые значения амплитуды  $u_m=46$  дБ.

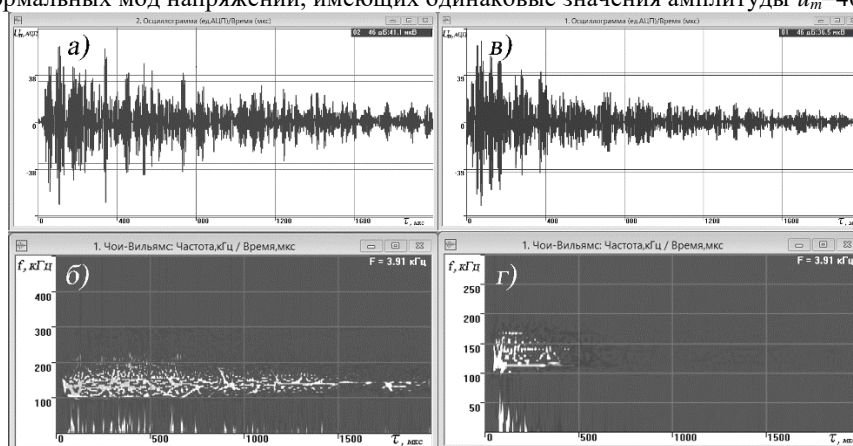


Рис. 1. Формы и спектрограммы сигналов № 1 (а, б) и № 2 (в, г) равной амплитуды, вызванные вязким и хрупким разрушением

## Заключение

Импульсы, генерируемые сдвиговыми процессами структурных преобразований, при сопоставимых уровнях энергетических параметров имеют существенно большую длительность по сравнению с сигналами хрупкого разрушения. Сопоставление таких импульсов на рис. 1 показывает, что диссипация энергии сигналов вязкого разрушения имеет примерно в пять раз большую длительность затухания. Поэтому параметр  $u_m/N_u$ , отражающий крутизну затухания амплитуды или тангенс угла наклона фронта ниспадающей волны, позволяет в режиме нагружения изделий разделять регистрируемые сигналы на потоки локационных импульсов, характерные для вязкого ( $u_m/N_u < 9,5$  мкВ/ед.) и хрупкого ( $u_m/N_u > 9,5$  мкВ/ед.) типов разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00769-П).  
[1]. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.  
[2]. Ботвина Л.Р. Разрушение, кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.

## Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций, изготавливаемых с использованием аддитивного производства

Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А.

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

E-mail: gvmoskvitin@yandex.ru

**Цель.** Целью исследования является анализ напряженно-деформированного состояния конструкций, производимых при помощи 3D-печати, оценка полей напряжений, полученных с помощью численных методов, реализуемых в пакетах прикладных инженерных программ.

В современных условиях все большую популярность приобретают аддитивные методы производства за счет меньших ресурсных затрат и использования более дешевых материалов, не уступающих по механическим свойствам металлическим сплавам. При проектировании конструкций необходимо учитывать многие эксплуатационные внешние и внутренние силовые факторы, приводящие к увеличению напряжений в тех или иных зонах конструкций. Принимая во внимание характерные особенности изделий, наиболее удобными методами их оценки при проектировании являются методы численного анализа, а именно метод конечных элементов, реализуемый в различных САПР (Системах Автоматизированного Проектирования).

**Материалы и методы.** Объектами исследования являются оригинальная рама квадрокоптера и пара зубчатых колес, находящихся в зацеплении. За материал рассматриваемых конструкций принят ABS-пластик. На первом этапе были проведены испытания материалов, используемых в аддитивном производстве (ABS и PLA), и получены необходимые механические характеристики (табл. 1.).

Таблица 1. Механические характеристики образцов из пластика.

Материал	ABS	PLA
Временное сопротивление, МПа	30,7	41,8
Прочность при отрыве, МПа	27,2	41,2
Модуль упругости, МПа	1686	2150
Коэффициент Пуассона	0,30 – 0,42	0,35 – 0,40

На втором этапе исследования были проведены численные расчеты при помощи программного комплекса AnsysWorkbench. Расчет производится по следующей схеме: задание параметров материала, создание геометрической модели конструкции, генерация конечно-элементной модели и моделирование нагрузок. Далее проводится оценка следующих результатов: максимальных значений напряжений и полей напряжений и деформаций (рис. 1.).

**Результаты.** Анализ полученных результатов показал, что конструкции удовлетворяют необходимым требованиям. Коэффициент запаса прочности конструкции рамы превышает значение 1,2 (при максимальных напряжениях, равных 21,683 МПа). Полученное максимальное контактное напряжение в зоне зацепления зубчатых колес равно 20,456 МПа, а предельное контактное напряжение, определенное аналитически – 32 МПа.

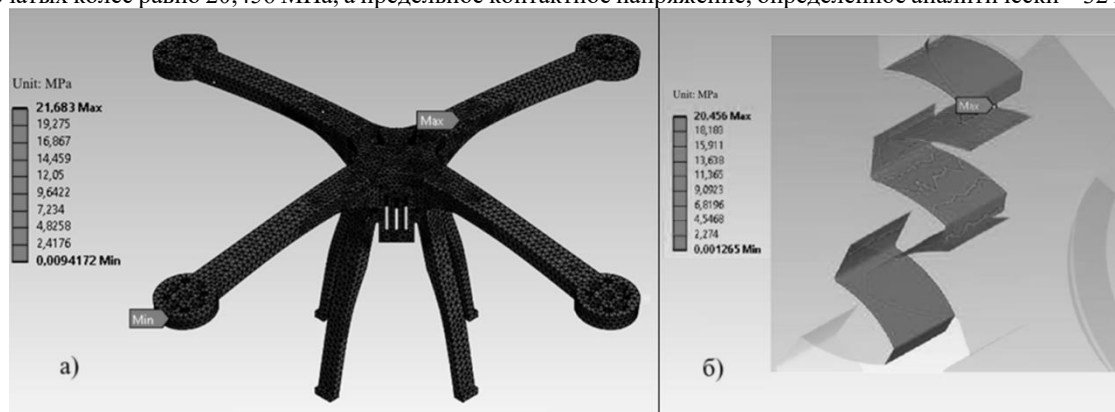


Рис. 1. Поля напряжений в раме (а) и зоне зацеплений зубчатых колес (б).

**Выводы.** Как показывает расчет, использование аддитивных технологий, пластика вместо металлических сплавов позволяет снизить затраты на изготовление, без потерь по прочности. В дальнейшем планируется модернизация численного метода исследования с учетом структуры изделий и материалов, проведение лабораторных испытаний самих конструкций зубчатых колес и рамы квадрокоптера, изготовленных с помощью моделирования методом наплавления (FDM) и проведение исследований с использованием материалов и технологии фотополимеризации (LCD).

[1]. Наумов О.В., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Поляков А.Н. Экспериментальная оценка (исследование) прочности деталей, получаемых на 3D-принтере // XXVIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2016). Сборник трудов конференции. 2017. – С. 461 – 464.

[2]. Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А., Полежаев Э.Р. Расчетно-экспериментальное исследование прочности материалов и некоторых изделий, созданных по аддитивной технологии // VI Международная научно-техническая конференция Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2022). Сборник трудов конференции. 2022. – С. 251 – 254.

[3]. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Части I и II // Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2010. 271 с.

## Прикладные исследования прочности, ресурса и безопасности сложных технических систем

*Москвичев В.В.*

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия;  
E-mail: krasn@ict.nsc.ru

В последнюю четверть XX века произошло изменение парадигмы расчетного обоснования конструкционной прочности, ресурса и надежности сложных технических систем (СТС) с переходом к решению проблем живучести и безопасности. Данные трансформации обусловлены проявлением ряда факторов и развитием новых технологий расчетов и проектирования СТС:

- создание уникальных, крупногабаритных и наукоемких, с большим энергетическим разрушающим потенциалом, технических систем различного назначения;
- проявление дилеммы научно-технического прогресса (ускоренное развитие техносферы и возникновение новых угроз человеку и природной среде со стороны объектов техносферы), приводящей к концепции «ненулевого риска аварий»;
- развитие методов и технологий математического моделирования при решении задач анализа напряженно – деформированных состояний (НДС);
- развитие расчетно – экспериментальных методов механики деформирования и разрушения, теории риск – анализа и безопасности.

При решении задач конструкционной прочности, механики деформирования и разрушения, ресурса и безопасности выделяются три направления и этапа ретроспективы проведенных исследований:

1. Проведение массовых испытаний образцов с трещинами малоуглеродистых и низколегированных сталей в широком диапазоне низких температур, обоснование критериев упругопластического разрушения, определение статистических функций распределения характеристик трещиностойкости и дефектности сварных конструкций, определение характеристик циклической и динамической трещиностойкости, разработка моделей вероятностной механики разрушения (1980-1990 гг.).

2. Решение задач конструкционной прочности, ресурса и надежности крупногабаритных машин, технологического оборудования и конструкций, разработка расчетно-экспериментальных методов механики разрушения и технологических методов обеспечения конструкционной прочности, создание автоматизированных систем проектирования изделий машиностроения (1986-2009 гг.).

3. Углубленные исследования в области безопасности СТС, включая развитие теорий надежности и риск-анализа, совершенствование методов и технологий конечно-элементного моделирования предельных, локальных и общих напряженно-деформированных состояний, аварийных ситуаций технических систем (2010-2023 гг.).

Отмеченные представления и полученные результаты стали основой полномасштабных исследований ряда уникальных СТС [1]:

1. Крупногабаритные машиностроительные конструкции – главные балки мостовых кранов для обслуживания энергоблоков АЭС, металлоконструкции карьерных экскаваторов, сосуды давления, сварные конструкции, трубопроводные системы, гидротурбинное оборудование ГЭС;

2. Металлокомпозитные баки высокого давления для электрореактивных двигательных установок космических аппаратов (КА);

3. Металлокомпозитные трубчатые элементы ферменных конструкций полезной нагрузки КА;

4. Композитные конструкции прецизионных рефлекторов для крупногабаритной антенны (до 12 м) наземных систем связи и для трансформируемого рефлектора (до 5 м) зонтичного типа космического базирования с повышенными требованиями среднеквадратического отклонения (СКО) геометрии рабочей поверхности.

Комбинированное использование традиционных критериев конструкционной прочности и критериев механики разрушения создает основу критериальной базы анализа безопасности сложных технических систем в рамках концепции ненулевого риска аварий и катастрофических разрушений. Безопасность становится основным приоритетом создания СТС, учитывая, что избыточная прочность и резервирование не исключают возникновения аварийных ситуаций.

[1] Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, Ю.И. Шокин, А.М. Лепихин и др. –Новосибирск: Наука, 2021. 796с.

## Исследование НДС рамных конструкций квадрокоптеров

*Наумов О.В., Москвитин Г.В.*

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

E-mail: Naumov57.on@gmail.com

В данной работе проведено исследование рамных конструкций квадрокоптеров, полученных с применением аддитивных технологий (3D печати). Квадрокоптеры широко применяют во многих отраслях для выполнения широкого круга задач.

Основной несущей способностью квадрокоптера является рамная конструкция. Вариации рамных конструкций зависят от конфигурации квадрокоптера, оборудования и оснастки. К рамам предъявляются следующие требования – надежность, прочность, относительно небольшая масса и низкая себестоимость. Данные параметры достигаются применением аддитивных технологий (3D печать), что позволяет получить сравнительно дешёвые элементы конструкции, снизить количество дефектов и время на постобработку.

Целью работы является расчет НДС вариаций рам квадрокоптеров полученных методом 3D печати и анализ полученных данных для каждого типа конструкций.

В качестве моделей выбраны рамы следующего типа (в зависимости от позиции лучей) – стандартная и гибридная Х – образная, Н – образная, Бокс – образная с расстоянием между пропеллерами (по диагонали) – 210 мм, толщина лучей – 3 и 4 мм. В качестве материала выбран пластик марки ABS [1].

Моделирование проведено в двух вариантах – в положении на земле и при подъеме вверх, с применением следующих нагрузок: сила тяжести, давление атмосферное, сила тяги (3Н x 4 мотора) и дополнительной нагрузки оборудования (10Н). Расчет проведен в программном комплексе SolidWorks (пакет Simulation) с использованием метода конечных элементов.

Получены результаты максимальных напряжений и перемещений. В положении на земле напряжения в конструкциях находятся в диапазоне до 5 - 10 МПа, что соответствует характеристикам пластика (1). Значения перемещений несущественно меняются к концам лучей (до 0,5 – 1 мм).

В положении в воздухе наблюдается увеличение напряжений в месте контакта лучей с базой и до середины луча Х – и Х – гибридных образных рам (до 10 - 15 МПа). Максимальное перемещение – 5,5 мм (при толщине луча 3 мм). Изменение распределения напряжений и перемещений в Н – и Бокс – образных происходит в месте перехода от середины конструкции (базы) на лучи, в месте перпендикулярного соединения балок, неравномерно. Скачкообразное изменение напряжения в перемычках между лучами не наблюдается (более 20 МПа), максимальное перемещение при толщине луча 4 мм – 5 мм.

Х - и Х - гибридные рамы показывают равномерное распределение напряжений и перемещений, что позволяет применять для выполнения широкого круга задач. Типы рамных конструкций Бокс - и Н – образные могут применяться для выполнения узкоспециализированных задач.

[1]. 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: XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2016). Москва, 2017. С. 57-60.



## Развитие наследственной механики Ю.Н. Работнова

Новоженова О.Г.

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

E-mail: info-viniti@yandex.ru

Ю.Н. Работнов проработал в ИМАШ РАН 20 лет - с 1965 по 1985 гг. Опубликованная им статья [1] о равновесии упругой среды с последствием, в которой он ввел  $\mathcal{E}_\alpha(\beta, t)$ -функции, стала в СССР предтечей дробного дифференцирования (фрактального исчисления). Он не использовал дробно-дифференциальную терминологию вязко-упругости, предпочитая интегральные уравнения Вольтерра со степенными ядрами. Позднее Розовский М.И. [2] установил связь  $\mathcal{E}$ -функции с двухпараметрической функцией Миттаг-Леффлера:

$$E_{\alpha,\beta}(z) = \sum \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + \beta)}, \quad z \in \mathbb{C}. \quad (1)$$

Т.Д. Шермергор [3] показал, что дробно-экспоненциальные ядра Работнова ведут к симметричной колоколообразной функции распределения времен релаксации  $H(\tau)$ , хотя обычно они являются существенно асимметричными в области перехода полимера из стеклообразного состояния в высокоэластичное. Для описания реальных спектров релаксации упруго-вязких тел было предложено использовать вырожденную гипергеометрическую функцию первого рода  ${}_1F_1(\alpha, 1, x)$ . Она может быть представлена рядом

$${}_1F_1(\alpha, 1, x) = 1 + \frac{\alpha}{(1!)^2} x + \frac{\alpha(\alpha+1)}{(2!)^2} x^2 + \dots + \frac{\alpha(\alpha+1)\dots(\alpha+n-1)}{(n!)^2} x^n + \dots, \quad (2)$$

для  $\alpha = 1$   ${}_1F_1(1, 1, -t/\tau) = \exp(-t/\tau)$ .

Дальнейшее развитие подход Работнова получил в книге Колокольчикова В.В. «Отображение функционалов памяти» [4]. В книге дана модификация операторных методов и методов последовательных приближений к решению задач нелинейной вязко-упругости. Основу подхода составляет алгебраизация по образам функций после интегрального преобразования отображения этих функций. При этом задача алгебры некоммутативных операторов решается с использованием последовательных приближений. В 1971г индийский математик Т.Р. Прабхакар предложил использовать трехпараметрическую функцию Миттаг - Леффлера:

$$E_{\alpha,\beta}^\gamma(z) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\gamma+k) z^k}{k! \Gamma(\alpha k + \beta)}, \quad (3)$$

которая существенно облегчила временной анализ по модели Гаврильяка-Негами. Более того, ее преобразование Лапласа дает очень простое аналитическое выражение:

$$L(t^{\beta-1} E_{\alpha,\beta}^\gamma(t^\alpha z); s) = \frac{s^{\alpha\gamma-\beta}}{(s^\alpha - z)^\gamma}, \quad R(s) > 0 \text{ и } |s|^\alpha > |z|. \quad (4)$$

В докладе также будет рассказано о новых 4-х (гауссова гипергеометрическая Диссадо-Хилла) и 5-ти параметрических функциях [6-7], а также представлена таблица результатах обращения преобразования Лапласа от иррациональных функций, полученных с помощью дробной производной  $\delta$ -функции Дирака [8].

[1]. Работнов Ю.Н. Равновесие упругой среды с последствием, ПММ, 1948, т.12, вып.1, с.53-62.

[2]. Novozhenova Olga G. Soviet pioneers of fractional calculus and its applications: II. Moses Rozovski International Journal of Applied Mathematics, 31, 3, 2018, pp. 325-332

[3]. Новоженова О.Г. Описание асимметричного спектра релаксации в вязкоупругих материалах и диэлектриках.- МКМ, 2019, т., 55, № 6, с.1185-1202.

[4]. Колокольчиков В.В. Отображения функционалов памяти. М. УРСС. 2001.

[5]. Prabhakar T.R., A singular integral equation with a generalized Mittag-Leffler function in the kernel. Yokohama Math. J. 19 (1971), 7, p.15-38

[6]. Юрасов Ю.И., Назаренко А.В. Новый подход к описанию диэлектрических спектров на основе модели Гаврильяка-Негами// Наука юга России, Физика 2018 Т. 14 № 4 С. 35–

[7]. DINZART F., LIPINSKI P. Improved five-parameter fractional derivative model for elastomers . Arch. Mech., 61, 6, pp. 459–474, Warszawa 2009

[8]. Nicos Makris The Fractional Derivative of the Dirac Delta Function and Additional Results on the Inverse Laplace Transform of Irrational Functions/Fractal Fract. 2021, 5, 18. <https://doi.org/10.3390/fractalfract5010018> <https://www.mdpi.com/journal/fractalfract>

## Оптимальная процедура исследования нелинейных деформационных процессов с использованием электронной спекл-интерферометрии

*Одинцев И.Н.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
ino54@mail.ru

Пусть исследованию подлежит некоторый деформационный процесс:  $R = f(\Psi)$ , где  $\Psi$  – определяющий фактор (изменяемая обобщенная нагрузка, время),  $R$  – обобщенный деформационный отклик. Характерной особенностью традиционных когерентно-оптических методов [1], в частности – голографической интерферометрии, является возможность лишь попарного сопоставления каких-либо  $i$ -го и  $j$ -го состояний тела с определением дискретного ряда приращений  $\Delta R_{ij}$ .

При использовании метода двух экспозиций в экспериментальном анализе процесса деформирования отклик, накопленный к текущему  $k$ -ому состоянию, определяется, как правило, в *режиме суммирования* данных:

$$R_k = R(\Psi_k) = \sum_{i=0}^{k-1} \Delta R_{i,i+1} \quad (1)$$

Очевидно, что с ростом  $k$  при этом происходит существенное накопление ошибок измерений.

Если в эксперименте задействован метод реального времени, то описание процесса выполняется в *режиме накопления* данных:

$$R_k = \Delta R_{0k} \quad (2)$$

Однако, для больших  $k$  уровень  $\Delta R_{0k}$  здесь вполне может выйти за верхнюю границу диапазона единичных интерференционно-оптических измерений.

Уникальной особенностью электронной спекл-интерферометрии является естественная возможность апостериорного сопоставления двух *произвольных* механических состояний тела при наличии последовательного ряда зарегистрированных спеклограмм его поверхности с получением в результате множества допустимых (с уверенностью не превышающих верхний предел) перекрестных приращений  $\Delta R_{ij} = F(\Psi_i) - F(\Psi_j)$ , ;  $i, j = 0, \dots, N; i \neq j$ . Следующий шаг состоит в решении методом наименьших квадратов переопределенной системы простейших уравнений типа

$$R_i - R_j = \Delta R_{ij} \quad (3)$$

относительно  $N$  неизвестных характеристик текущих деформированных состояний. Очевидно, что в этом случае все получаемые оценки  $R_k, k = 1, \dots, N$  взаимосогласованы, а их погрешности минимизируются.

В качестве примера применения описанной процедуры на рисунке представлены результаты построения диаграмм изгибного упругопластического деформирования в двух циклах «нагрузка – разгрузка» образца-полосы из графита МПГ-6. Здесь:  $\Psi = M$  – изгибающий момент,  $R = \chi$  – приобретенная кривизна.

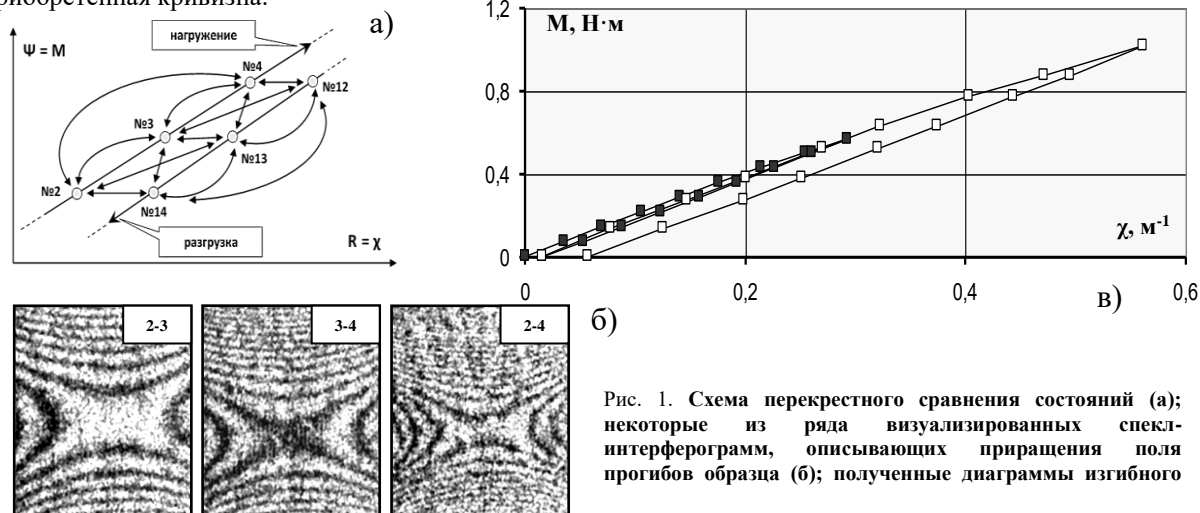


Рис. 1. Схема перекрестного сравнения состояний (а); некоторые из ряда визуализированных спекл-интерферограмм, описывающих приращения поля прогибов образца (б); полученные диаграммы изгибного

Отметим, что некоторая трудоемкость рассмотренной процедуры, связанная с обработкой значительных массивов данных, компенсируется повышением точности и достоверности окончательных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 20-19-00769-П).

[1]. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твёрдого тела: М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 240 с.

## **К построению комплексных инженерных онтологий при проектировании машин для открытых горных работ**

<sup>1</sup>Побегайло П.А., <sup>2</sup>Гадолina И.В.

<sup>1</sup>Независимый исследователь, Москва, Россия;

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

E-mail: gadolina@mail.ru

Начиная уже с конца 60-ых годов прошлого века ведется речь об автоматизации процессов проектирования горных машин и, в частности, про автоматизацию проектирования машин для открытых горных работ (МДОГР).

При этом – не смотря на колоссальный объем истраченных ресурсов и потраченных усилий – полностью решить этот вопрос все еще не удалось – человек все так же занят старой и привычной проектной и конструкторской деятельностью – ведь замена кульмана на монитор и мышшь, справочников в бумаге на несколько обычно разрозненных и неполных баз данных, логарифмической линейки или калькулятора на суперэвм и внедрения в риторику «цифровых терминов» не являются достаточными и решающими в деле минимизации роли человека в деятельности по созданию средств производства, качество которых при этом должно было бы расти или хотя бы поддерживаться на высоком и постоянном уровне, исключая провалы, аварии и срывы, чего сейчас часто не наблюдается.

Одной из причин активно сдерживающих автоматизацию деятельности по проектированию МДОГР является недостаточная развитость горного машиностроения в части разработки и внедрения т.н. инженерных онтологий (ИО) [1 - 3] – смысловых моделей, описывающих как жизненный цикл (ЖЦ) МДОГР в целом, так и отдельные его элементы и фрагменты (отметим, что дезинтеграционными факторами тут выступают как междисциплинарность проектной деятельности и потребность часто учитывать в комплексных ИО и предприятие – изготовитель, и предприятие – эксплуатирующее технику, так и опережающий рост сложности средств производства над пониманием сути дела).

Кроме этого, в горном машиностроении всё еще недостаточно развиты и методологические исследования многих вопросов и тем связанных с созданием и эксплуатацией МДОГР, а ведь они самым тесным образом сплетены с разработками ИО – которые, для выделенной предметно-ориентированной области человеческой деятельности (ПООЧД), должны в конечном счете складываться в единые и логически увязанные конструкты (технологии) – практическим итогом чего, в частности, должны быть комплексные информационные продукты (системы) и «каркасы» отдельных новых инженерных дисциплин (например – создание и эксплуатация машин для земляных работ и т.д.).

Отметим, что исследования, выполняемые авторами настоящего доклада, на сегодня привязаны не ко всему множеству МДОГР, но только к карьерным экскаваторам (КЭ) – т.к. это машины широко распространенные, важные, дорогие и сложные, типичные манипуляционные системы. При этом авторы в последнее время работают как над снятием тех или иных методологических и онтологических проблем, так и над разрешением отдельных технических вопросов – имея в виду в конечном счёте создание системы экспресс диагностики (СЭД) КЭ (и в первую голову для тех машин, что работают в экстремальных климатических условиях, а их формальный срок эксплуатации уже превышен), что является одним из ключевых шагов по созданию информационных систем большего охвата и глубины для данной ПООЧД. При этом процесс эксплуатации (а иногда и весь ЖЦ) КЭ рассматривается нами как гомеостатическая функциональная (в смысле П.К. Анохина) система (структура и-или лингвистическая сущность, что приводит нас попутно к пониманию того, что в горном машиностроении давно назрел структурный и лингвистический повороты) – поддержание которой в области гомеостаза и является задачей эксплуатантов и проектантов – основой их Деятельности.

На сегодня в части разработки ИО нами выполнено следующее:

- сформулирована потребность, цель и задачи работы над конкретными ИО для МДОГР;
- выделена предметная область для текущей нашей работы (рабочее оборудование КЭ и система ремонта КЭ с разными типами привода в условиях эксплуатации и в – частном важном случае – в условиях отсутствия любой поддержки от завода изготовителя);
- определены предварительно основные Сущности, виды и типы Отношений между ними, а также выявлена многомерность и склонность к ветвлению у такого рода ИО («онтологический взрыв»);
- в качестве локального практического примера, на достаточном для практики уровне, разработана оригинальная ИО для ковша КЭ;
- предложен «каркас» для новой комплексной инженерной дисциплины «разработка и эксплуатация КЭ» и концепция многомерной онтологической вязи (онтологический гиперграф);
- намечены пути для дальнейшей исследовательской Деятельности.

Данные наработки являются важной частью фундамента для разрабатываемой нами СЭД КЭ, кроме того, позволяя вычлнять и устранять те или иные лакуны в Знании людей о такого рода средствах производства.

[1]. Смирнов С.В. Онтологии как смысловые модели / С.В. Смирнов // Онтология проектирования. – 2013. - №2(8). – С. 12-19.

[2] Соснина Т.Н. Онтология проектирования в контексте постулатов теории предмета труда / Т.Н. Соснина // Онтология проектирования. – 2015. - №2(16). – С. 206-222.

[3]. Gruber, T. A translation approach to portable ontology specifications / T. Gruber // Knowledge Acquisition. – 1993. - Vol. 5. – P. 199-220.

## Анализ живучести пластины со сквозной поперечной трещиной нормального отрыва с учетом двухмерного стеснения деформаций по ее фронту

<sup>1</sup>Покровский А.М., <sup>2</sup>Матвиенко Ю.Г., <sup>1</sup>Егранов М.П., <sup>1</sup>Захаров П.М.

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

E-mail: pokrovsky@bmstu.ru

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Адекватная оценка живучести конструкций с трещинами нормального отрыва является чрезвычайно актуальной задачей, так как данный тип трещин наиболее распространен. Целью настоящей работы является разработать методику, создать программные средства и провести анализ живучести пластины с поперечной сквозной трещиной нормального отрыва при двухосном циклическом нагружении. В основу расчета положен авторский конечно-элементный программный комплекс. В расчете использован предложенный ранее авторами двухпараметрический критерий разрушения, учитывающий двухмерное стеснение деформаций по фронту трещины [1]. Данный критерий является усовершенствованным вариантом однопараметрического критерия максимальных тангенциальных напряжений (МТН) [2], согласно которому, максимальные тангенциальные напряжения в зоне предразрушения равны предельному значению. В предложенном критерии за предельное напряжение принята локальная прочность материала, которая зависит от предела текучести и несингулярных  $T_{xx}$ - и  $T_{zz}$ -напряжений, входящих в разложение Вильямса для напряжений [3]. Размер зоны предразрушения в классическом критерии МТН принимается равным поправке Ирвина на пластическую зону. В данном случае размер зоны предразрушения вычисляется также на основании гипотезы пластичности Треска-Сен-Венана, но только с учетом  $T$ -напряжений. В результате получается выражение для эффективного коэффициента интенсивности напряжений (КИН), в который кроме обычного КИН входят еще отношения  $T_{xx}$ - и  $T_{zz}$ -напряжений к пределу текучести

$$K_I^{эф} = \frac{2(1+\chi_z)K_I}{\sqrt{(\chi_x - 2\chi_z)^2 + 4(1 - \chi_x^2 - \chi_z^2 + \chi_x\chi_z)} - \chi_x + 2\chi_z}, \quad (1)$$

где  $K_I$  – КИН;  $\chi_x = T_{xx} / \sigma_T$ ,  $\chi_z = T_{zz} / \sigma_T$  – отношения  $T_{xx}$  и  $T_{zz}$  к пределу текучести соответственно.

Введение в критерий разрушения  $T_{xx}$ -напряжений позволяет учесть стеснение деформаций поперек фронта трещины, а  $T_{zz}$ -напряжений вдоль фронта. Учет  $T_{xx}$ -напряжений дает возможность учесть влияние поперечных растягивающих напряжений, а учет  $T_{zz}$ -напряжений – толщину пластины. Условием разрушения является равенство эффективного КИН вязкости разрушения материала, то есть критическому значению КИН полученному при максимальном стеснении деформации. Для расчета на живучесть предлагается использовать модернизированное уравнение Пэриса, в которое вместо размаха обычного КИН подставляется размах эффективного КИН. Тогда выражение для определения увеличения полудлины трещина за шаг циклов нагружения имеет вид:

$$\Delta l = C \left( \Delta K_I^{эф} \right)^m \Delta N, \quad (2)$$

где  $\Delta K_I^{эф}$  – размах эффективного КИН,  $\Delta N$  – шаг циклов нагружения,  $C$  и  $m$  – зависящие от материала коэффициенты.

Ценность предлагаемой методики заключается в том, что для определения долговечности используются только стандартные механические характеристики материала детали – предел текучести и вязкость разрушения, а также коэффициенты, входящие в уравнения Пэриса. Проведенные расчеты показали, что с увеличением толщины пластины за счет повышения стеснения деформаций по фронту трещины значение эффективного КИН возрастает, и поэтому трещина растет быстрее и долговечность снижается. Выявлено, что с повышением коэффициента асимметрии цикла нагружения, при условии постоянного размаха напряжений, максимальный эффективный КИН быстрее достигает критического значения, равного вязкости разрушения, поэтому долговечность уменьшается. Доказано, что при двухосном циклическом растяжении пластины, увеличение напряжений, направленных параллельно берегам трещины, приводит к повышению стеснения деформаций по фронту трещины и поэтому снижению долговечности. Установлено, что при одноосном циклическом растяжении долговечность, прогнозируемая по предлагаемой методике, получается выше, чем в случае классического подхода, когда в уравнение Пэриса подставляется размах обычного КИН. При двухосном циклическом растяжении получается наоборот. То есть классическая теория не всегда дает консервативную оценку живучести, что свидетельствует о целесообразности использования разработанной методики расчета на живучесть с учетом двухосного стеснения деформаций по фронту трещины.

[1]. Покровский А.М., Матвиенко Ю.Г. Критерий разрушения, учитывающий двухосное стеснение деформаций по фронту трещины нормального отрыва // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 4. С. 34-44,

[2]. Erdogan F., Sih G.C. On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear. Journal of Basic Engineering, 1963, vol. 85 (4), pp. 519-525.

[3]. Williams M.L. On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack. Journal of Applied Mechanics, 1957, vol. 24 (1), pp. 109-114.

## Модели «сбрасывания» концентрации напряжений в биоподобных композитах

Полилов А.Н.

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

E-mail: polilovan@mail.ru

Одна из фундаментальных задач проектирования композитных элементов и мест их крепления состоит в изучении и использовании приёмов, применяемых Природой при создании прочных и надежных биологических материалов-конструкций: древесины, бамбука, кости, паутины, раковины, дентина зуба, хитинового покрова насекомых. Именно поэтому в последние годы столь большое внимание уделяется изучению иерархической структуры живых материалов, обеспечивающих, наряду с выполнением основных функций, ещё и высокую прочность в сочетании с высокой трещиностойкостью [1-3], что не удается одновременно реализовать в традиционных, квазиоднородных сплавах: сдерживать рост трещины приходится ростом пластической зоны, что требует снижения предела текучести. В живых материалах (древесина, кость) за счет сложной структуры, сочетающей прочные и вязкие, полужидкие элементы, удается реализовать различные механизмы торможения трещин, что можно в какой-то мере попытаться применить при проектировании структуры волокнистых композитных материалов-конструкций [4]. Механизмы торможения трещин в биоматериалах можно разделить на происходящие: 1) перед вершиной трещины, 2) в области за фронтом трещины, 3) за счет криволинейной структуры армирования. С первым механизмом связаны разные виды ветвления и поворота трещины из-за чередования «сильных» и «слабых» элементов и наличия непрочных границ раздела между ними. Ко второму классу механизмов относится сохранение различных микро-тяжей, «волокон-мостиков», соединяющих берега трещины, типа наблюдаемых при колке дров (древесина всегда имеет несколько свилеватую, разориентированную структуру, затрудняющую расщепление). Третий механизм снятия концентрации напряжений реализуется в структуре армирования, характерной для зоны сучка в стволе дерева. В наших исследованиях – на примере эллиптических и круговых отверстий в волокнистых композитах – были рассмотрены и численно оценены три подобные модели «сбрасывания» концентрации напряжений. В ортотропной пластине с эллиптическим отверстием ( $a$  – большая полуось,  $\rho$  – радиус кривизны в вершине) теоретический коэффициент концентрации напряжений, характеризующий местное повышение напряжений, оказывается для кругового отверстия значительно больше трех.

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\infty}} = 1 + \sqrt{\frac{a}{\rho} \sqrt{\frac{E_{22}}{G_{12}} - 2\nu_{12} \frac{E_{22}}{E_{11}} + \frac{E_{22}}{E_{11}}}} \xrightarrow{a=\rho; E_{ij}/E_{22} \rightarrow 0} 1 + \sqrt{\frac{E_{22}}{G_{12}}} \approx 5 \div 7. \quad (1)$$

Здесь  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  – модули Юнга поперек и вдоль волокон,  $G_{12}$  – модуль сдвига,  $\nu_{12}$  – коэффициент Пуассона.

Однако реальный коэффициент снижения прочности в композитных пластинах с отверстием оказывается намного ниже, не более двух.

1) Первый механизм снижения эффективной концентрации напряжений связан с растрескиванием полимерной матрицы около отверстия, что эквивалентно «затуплению» отверстия, и для оценки снижения прочности следует в (1) заменить реальный радиус кривизны  $\rho$  в вершине некоторым феноменологическим радиусом  $R^*$ , характерным для данного материала. Из условия соответствия опытам на стеклопластиковых пластинах с круговыми отверстиями разных диаметров значение  $R^*$  имеет порядок 160-200 мм, что позволяет описывать масштабный эффект прочности.

2) Второй механизм, характерный для однонаправленных композитов, связан с расщеплением вдоль волокон, начинающемся на контуре отверстия и происходящем в основном под действием касательных напряжений вдоль волокон. В результате расщепления остается очень мелкая выточка, расчетную глубину которой следует подставить в (1) вместо начального размера  $a$ , и для кругового отверстия получается близкая к экспериментам оценка коэффициента снижения прочности 1.5-1.6, а для сколь угодно вытянутого отверстия в расщепляющемся композите местное повышение напряжений перед окончательным разрушением не может превышать 1.82.

3) Наиболее перспективным методом создания биоподобных (типа сучка) мест крепления композитных деталей следует считать использование специально смоделированных структур армирования, в которых итерационно построенные криволинейные траектории волокон согласуются с локальными направлениями главных растягивающих напряжений в зоне свободных или нагруженных (через болты, заклёпки) отверстий. При этом отсутствие касательных напряжений исключает опасность расщеплений, а сгущение волокон в зоне повышенных напряжений приводит к тому, что за счет перераспределения напряжений на несущие волокна в квази-однонаправленных композитах с волокнами, «обтекающими» отверстие, местное повышение напряжений (в расчете на волокно) становится не 5-6 согласно (1), а всего лишь 1.3. Это реальная перспектива создания композитных узлов крепления через отверстия, которые будут снижать несущую способность не на 200-500%, а всего лишь на 20-30%.

[1]. Wegst U.G.K., Bai H., Saiz E., Tomsia A.P., Ritchie R.O. Bioinspired structural materials. Nature Materials. 2015. Vol. 14, p. 23-36.

[2]. Müller U., Gindl-Altmutter W., Konnerth J., Maier G.A., Keckes J. Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces. Nature. Scientific Reports. 2015. p. 1. DOI:10.1038/step14522.

[3]. Zheng L., Zhang K., Liu L., Xu F. Biomimetic architecture Kevlar/polyimide composites with ultra-light superior anti-compressive and flame-retardant properties. Composites Part B. 2022, N 230, 109485, p. 1-9.

[4]. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2018. 328 с.

## К исследованиям полей остаточных напряжений на основе обработки данным измерений деформационных откликов, возникающих при создании единственного разреза

<sup>1</sup>Разумовский И.А., <sup>2</sup>Усов С.М.

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН Москва, Россия;  
E-mail: murza45@gmail.com

<sup>2</sup> НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, Москва, Россия

**Цель доклада** – аналитический обзор выполненных в последние годы исследований в области разработки методов экспериментального анализа существенно неоднородных полей остаточных напряжений (ОН) в двумерной постановке. В основе методов – математическая обработка результатов регистрации полей перемещений или деформаций, возникающих в зоне единственного создаваемого в детали разреза-индикатора ОН, оптико-интерференционными или оптико-цифровыми методами.

**Постановка задачи и полученные результаты.** Анализ остаточных напряжений (ОН) является одной из наиболее сложных проблем механики деформируемого твердого тела, т.к. предполагает анализ физико-механических процессов и структурных преобразований, происходящих в материале при разнообразных механических и тепловых воздействиях. Задача определения двумерных неоднородных полей ОН относится к классу обратных задач механики, характерной особенностью которых является некорректность, проявляющаяся в том, что близким (в пределах погрешности эксперимента) распределения регистрируемых экспериментальными методами параметров могут соответствовать существенно различные распределения ОН по линии разреза [1]. Соответствующие подходы к исследованию ОН основаны на постановке задачи анализа ОН как обратной задачи теории упругости и сводятся к решениям интегральных уравнений типа Вольтерра или Фредгольма. Практическая реализация таких подходов связана с математической обработкой значительного объема экспериментальной информации, получение которого возможно только с применением интерференционно-оптических методов в качестве способа регистрации деформационного отклика, обусловленного разрезкой детали.

Метод, основанный на решении уравнения Вольтерра [1,2], требует проведения регистрации деформационного отклика на каждом шаге разреза-индикатора ОН с последующей обработкой значительных массивов экспериментальных данных. Метод интегрального уравнения Фредгольма заключается в определении ОН по полям деформационных откликов, получаемых при создании в исследуемом объекте единственного разреза  $S$ . С другой стороны, уравнение Фредгольма при прочих равных условиях имеет существенно худшую обусловленность, чем уравнение Вольтерра, т.е. его использование при решении практических задач может привести к большим погрешностям.

В работе [3] предложена методика исследования ОН, заключающаяся в математической обработке полей деформационного отклика в зоне отверстия, расположенного непосредственно в области их существенно неоднородного распределения. В принципе, такой подход сводится к интегральному уравнению Фредгольма; при этом решение соответствующей краевой задачи теории упругости можно получить на основе полученного Н.И. Мухелишвили решения плоской задачи теории упругости для пластины неограниченных размеров с вырезом произвольной формы, на контуре  $S$  которого действуют произвольные нормальные и тангенциальные нагрузки  $N(s)$  и  $T(s)$ . Очевидно, что эти нагрузки можно рассматривать как искомые ОН.

В работах [3] и [4] на основе экспериментального исследования на плоской оптической модели, а также численных экспериментов показано, что при использовании методов оптически чувствительных покрытий (для измерения деформаций) или электронной цифровой спекл-интерферометрии (для измерения тангенциальных перемещений) рассмотренный подход позволяет с высокой точностью проводить исследования высокоградиентных (вплоть до скачкообразных) распределений ОН. Приводятся рекомендации, позволяющие установить требования к точности, объёму, зоне локализации экспериментальной информации, а также оптимальному количеству членов разложения функции напряжений в ряды Фурье, которое следует учитывать при расчётах.

В докладе будут также представлены результаты модельного исследования существенно неоднородного ОН с использованием метода корреляции цифровых изображений, имеющего существенно более низкую чувствительность, чем метод электронной цифровой спекл-интерферометрии.

Заключительная часть доклада посвящена ещё одной методике исследования неоднородных полей ОН, в основе которой лежит математическая обработка полей деформационного отклика (деформаций или перемещений), возникающих вследствие разрезки детали по прямой линии. При этом для расчёта распределения остаточных напряжений используется решение задачи теории упругости о действии самоуравновешенной нагрузки на торце прямоугольной полубесконечной полосы в рядах Матье [5].

[1]. Дверес М.Н., Фомин А.В. Методы определения остаточных напряжений // *Машиноведение*. 1985. № 5. С. 23-29.

[2]. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel / Ed. G.Totten, M.Howes, T.Unoue. ASM International. 2002. 499 p.

[3]. Razumovsky I.A., Usov S.M. Development of the hole-drilling method as applied to the study of inhomogeneous residual stress fields // *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2022. V. 50. № 8. pp. 727-734.

[4]. Razumovsky I.A., Usov S.M. In the matter of study of high-gradient residual stress fields using mathematical processing of displacement fields registered by optical-digital methods // *Journal of machinery manufacture and reliability*. 2022. V. 51. № 9. P. 68-78.

[5]. Разумовский И.А., Усов С.М. Развитие метода сверления отверстия применительно к исследованию неоднородных полей остаточных напряжений // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2023. № 2. С. 47-35

## Развитие нелинейности петель гистерезиса однонаправленного углепластика при повторном квазистатическом растяжении

Северов П.Б.

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

E-mail: alpinprom@yandex.ru

Пребывание материала в поле приложенных нагрузок неизбежно вносит изменения в его структуру, и эти изменения, напрямую связанные с накоплением повреждений, приводят к изменению свойств материала на макроуровне. Цель работы – демонстрация развития нелинейности ветвей петель гистерезиса однонаправленного углепластика при повторно квазистатическом растяжении в направлении максимальной жесткости. Нагружение образца производилось до разрушения на сервогидравлической испытательной машине с управлением по перемещению активного захвата. От цикла к циклу максимальные перемещения увеличивались с шагом 100 мкм. Нелинейные составляющие верхних и нижних ветвей петель гистерезиса определялись путем вычитания из уравнений ветвей, полученных аппроксимацией экспериментальных точек полиномами 6-й степени, их линейных составляющих [1].

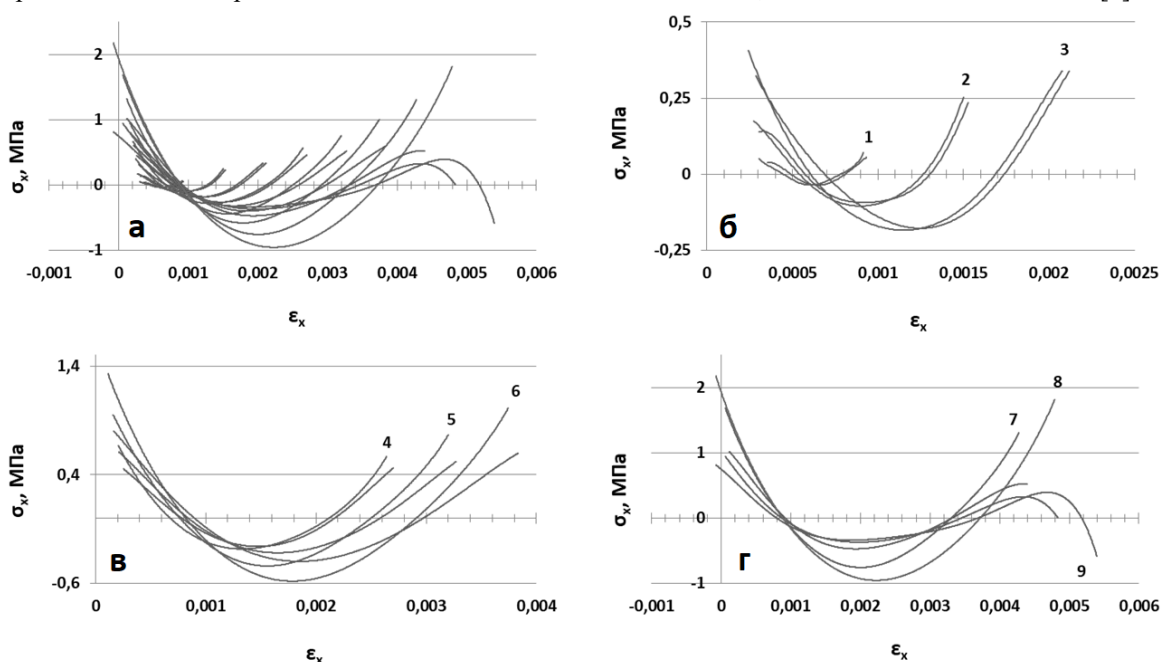


Рис. 1. Нелинейные составляющие верхних и нижних ветвей петель гистерезиса в циклах 1-9 (а), 1-3 (б), 4-6 (в) и 7-9 (г)

Нелинейные составляющие верхних и нижних ветвей 9-ти петель гистерезиса представлены на рисунке 1(а). В первых двух циклах нагружения 1 и 2 (рис.1(б)) наблюдается почти идеальное наложение нелинейных составляющих верхних и нижних ветвей, что свидетельствует о нелинейной упругости материала в начале нагружения на фоне незначительного количества повреждений. В цикле 3 указанное качество сохраняется при видимом нарушении наложения кривых. В циклах нагружения 4 – 6 (рис. 1(в)) с ростом уровня накопленных повреждений расхождение между кривыми становится все более существенным. При этом нелинейные составляющие нижних ветвей сохраняют свои нелинейные свойства, а нелинейные составляющие верхних ветвей начинают их терять – наблюдается тенденция к выпрямлению. В следующих циклах нагружения (рис. 1(г)) нелинейные свойства нижних ветвей сохраняются, а у верхних ветвей образуется второй экстремум в области положительных значений напряжений, что указывает на переход материала в качественно новое состояние с высоким уровнем накопленных повреждений. В ходе нагружения первоначальная нелинейная упругость углепластика разрушается на участках активного деформирования (верхние ветви петель гистерезиса) с плавным переходом в стадию неупругого деформирования вплоть до разрушения. Именно на участках активного деформирования регистрируется наибольшее количество акустико-эмиссионных импульсов, источниками которых выступают дискретные акты повреждения углепластика на микро и мезо уровнях.

[1]. P.B. Severov. Accurate Analysis of the Nonlinearity of Hysteresis Loops in the Areas of Active and Passive Deformation of CFRP Laminate under Repeated Quasi-static Loading. MS ID: AIPCP23-CF-MESO2022-00126.

# Рациональное проектирование структуры армирования для повышения несущей способности композитных баллонов

Склемина О.Ю.

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

E-mail: sklemina97@yandex.ru

## Цель:

разработать методы рационального проектирования структуры армирования композитных сосудов давления, позволяющих учесть комплексное влияние масштабного, технологических и эксплуатационных факторов.

## Основные задачи исследования:

- проанализировать существующие методы изготовления намоточных сосудов давления из композиционных материалов, чтобы обосновать возможности реализации рациональных структур армирования;
- разработать рекомендации по расчету траекторий намотки, по технологии изготовления трубчатых образцов, по созданию системы их крепления при испытаниях;
- обосновать критерии прочности и методы построения предельных поверхностей для симметричных пар слоев, используемых при намотке;
- разработать послойный метод расчета и оптимизации композитных конструкции с учетом деградации свойств в процессе докритического разрушения;
- провести МКЭ расчеты цилиндрической, донной частей и зон полюсных отверстий в программном комплексе ANSYS.
- разработать комплекс методов проектирования и технологии производства намоточных сосудов давления.

## Методы проектного расчета композитных намоточных труб и сосудов давления

В данном исследовании использовались математические методы расчета композитных сосудов давления, метод конечных элементов (МКЭ), экспериментальные, статистические методы обработки данных, численные методы механики деформируемого твердого тела, механики композитных материалов, методы построения предельных поверхностей в пространстве напряжений на основе критериев прочности для пар слоев.

Выбранная из некоторых технологических соображений реальная *A*-структура армирования пятью семействами пар слоев баллонов из стеклопластика, используемых в легких грузовиках для хранения газового топлива, представлена в табл.1. На рис.1 построены предельные поверхности в пространстве напряжений по новым критериям прочности для симметричных пар слоев. На основании выбора рациональных структур армирования *B* и *C* удастся повысить расчетное критическое давление примерно на 40%.

Таблица 1. Схемы армирования баллонов со структурами армирования *A, B* и *C* [1,2]

<i>i</i>	$\pm\alpha_i, ^\circ$	$n_i$		
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
1	16	2	0	0
2	18	4	4	2
3	52	2	2	2
4	63	2	2	2
5	90	4	6	4
1- <i>C</i>	49	0	0	4

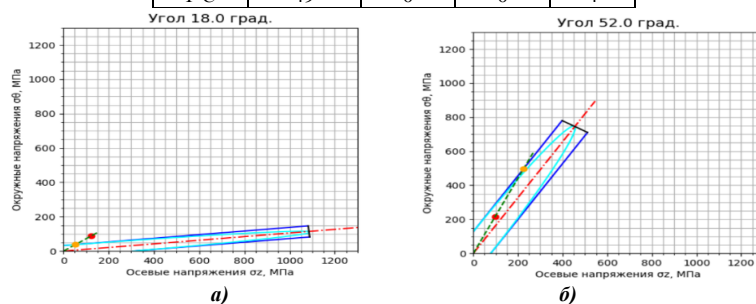


Рис.1. Построение предельных поверхностей для разных углов в программе рационального выбора углов армирования с целью создания равнонапряженной волокнистой структуры

## Выводы:

- обоснованы упрощенные, инженерные методы расчета и оптимизации структуры армирования волокнистых композитов – в частности, намоточных труб и сосудов давления;
- проанализировано применение упрощенного послойного метода расчета через пары слоев;
- разработана компьютерная программа для выбора рациональной структуры армирования;
- показано, что расчеты для сильно анизотропных материалов не сложнее, а иногда и проще, чем для изотропных.

[1]. Polilov A.N., Sklemina O.Y., Tatus N.A. Design method of reinforcement structure with symmetric pairs of layers by the example of composite gas tank. Mechanics of Composite Materials. 2021. Vol. 57, N 6, p. 769-784.

[2]. Sklemina O.Y., Polilov A.N. Method of structure reinforcement optimizing for composite gas tank. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2697. N 1.



## Навеянные природой принципы проектирования материалов и конструкций

Татусь Н.А.

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

E-mail: nikalet@mail.ru

Доклад посвящен обзору современных работ по бионике, биомиметике, биомеханике, которые направлены на анализ структуры и свойств биологических конструкций. Рассматриваются природные структуры, обладающие особыми механическими характеристиками, показана способность Природы создавать из похожих по химическому составу материалов конструкции с очень разными прочностными и жесткостными свойствами.

Показаны работы, ценность которых состоит в первую очередь в глубоком изучении с помощью современной увеличивающей техники внутренней структуры материалов природных конструкций. Во вторую очередь - в попытках применения опыта Живой Природы для создания эффективных конструкций, эксплуатационные свойства которых должны быть близки природным. В большинстве случаев это только модели, но их характеристики поражают, поэтому работы в области изучения природных конструкций набирают все большую популярность среди ученых.

Показано применение топологической оптимизации для создания конструкций близких к природным как по виду, так и по способности сопротивляться внешним воздействиям.

Проведен анализ работ ученых, исследующих структурные особенности природных материалов, а также примеры демонстрирующие эффект от применения природного опыта при проектировании искусственных конструкций. Показано как Природа создает прочные, легкие, твердые структуры и почему нельзя увеличить муравья, сохранив его способность перетаскивать грузы больше собственного веса.

Современные инженеры при проектировании конструкций все чаще обращаются к Природе – самому старому и опытному конструктору, проектировщику, оптимизатору и рационализатору на Земле. Это сотрудничество имеет название, точнее несколько: биомиметика или биомимикрия (происходят от древнегреческого: βίος (bios) - жизнь; μίμησις (mīmēsis) - имитация; μιμεῖσθαι (mīmeisthai) – подражать; μίμος (мимос) - актер) – это термины, применяемые за рубежом, есть и отечественный аналог – бионика (от древнегреческого βίον - «живущее»). Все эти названия по сути одной и той же науки, которая имеет, на первый взгляд, прикладную направленность: перенимание (заимствование) принципов организации, свойств, функций и структур живой природы для применения в конструкциях и технических системах. Для результатов такого процесса придуман специальный термин, очень хорошо отражающий суть - bio-inspired – навеянный, вдохновленный Природой. Раньше подражание сводилось к копированию внешнего вида, в настоящий момент интересно скопировать характеристики биологической конструкции, например: высокую прочность и трещиностойкость, как у зубов, высокую прочность, эластичность и способность запасать большую упругую энергию, как у мышц, возможность подстраиваться под внешние нагрузки как у деревьев, да и у всех живых организмов в целом. Под биомеханикой подразумевается моделирование биологических конструкций с целью понимания алгоритмов их работы для последующего применения этих алгоритмов при проектировании рукотворных конструкций.

Доклад состоит из разделов, в заглавие которых вынесены обсуждаемые в них характеристики природных объектов, которые, в свою очередь, применяются при проектировании рукотворных конструкций. Интересы автора лежат в области механики композитных материалов, поэтому приведенные примеры относятся в большей степени к прочности и жесткости различных конструктивных элементов.

На рис. 1 а), б) показано соотношение вязкостных и жесткостных характеристик для конструктивных и биологических материалов, видно, куда надо стремиться современным инженерам – в биологических материалах увеличение вязкости не ведет к снижению прочности.

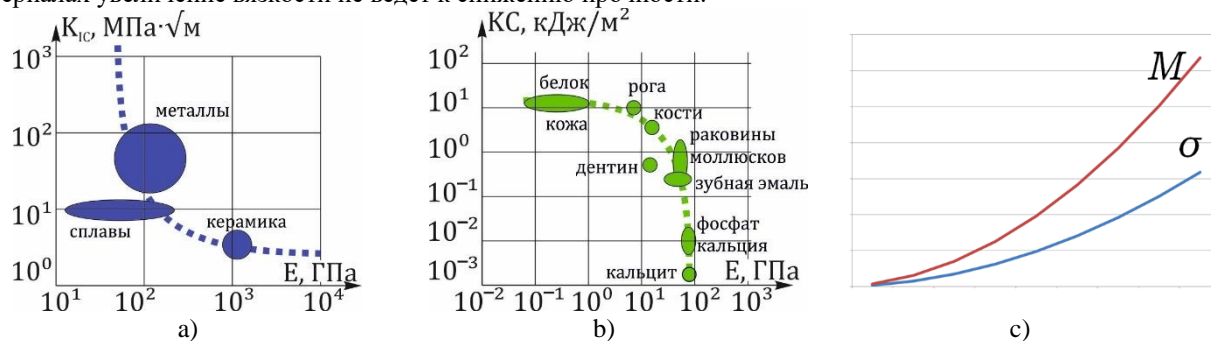


Рис. 1. а) Зависимость коэффициента интенсивности напряжений и модуля упругости конструктивных материалов, б) вязкости разрушения и модуля упругости биологических материалов, в) изменение массы и прочности при увеличении размеров конструкции.

## Оценка влияния нарушений формы поперечных сечений трубопроводов на их прочность

Фесенко Т.Н., Дронова Е.А.

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

E-Mail: ftat50@yandex.ru

Оценивается влияние дефектов формы сечений магистральных газопроводов на их прочность. В качестве дефектов нарушения формы поперечных сечений рассматривается гофр. Гофр образуется в результате чрезмерных пластических деформаций при поперечном изгибе трубопровода в сжатой зоне сечения непосредственно в месте приложения нагрузки. Классическим примером гофра является так называемый «излом» трубопровода при укладочных работах. Такой гофр вытянут в окружном направлении и имеет малую длину в направлении оси трубопровода. Рассматриваемые дефекты имеют габаритные поверхностные размеры одного порядка и представляют собой местное плавное изменение формы поверхности трубы. Аналитические методы оценки напряженного состояния (в рамках теории тонкостенных оболочек) применимы для дефектов, глубина которых не превышает 5-ти толщин стенок трубы. Влияние вмятин на прочность труб во времени существенно, так как разрушение трубы может произойти при давлении, составляющим около 85% от разрушающего для бездефектной трубы.[1]. Рассматриваем гофр на прямоугольной цилиндрической панели с размерами  $A \times B$  или  $2a \times 2b$ . Хорда, соответствующая окружному размеру  $B$ , равна  $B'$ . Уравнение начальной срединной поверхности гофра можно представить в виде зависимости начальных радиальных перемещений  $w$ , отсчитываемых от идеальной цилиндрической поверхности, от продольной  $\alpha$  и угловой  $\beta$  координат:

$$w = w_0 \cos^3 \alpha \cos^3 \beta, \quad (1)$$

где:  $t = \frac{r}{a} \times \frac{\pi}{2}$ ;  $u = \frac{r}{b} \times \frac{\pi}{2}$ ;  $\alpha = \frac{x}{r}$ ,  $w_0$  - начальная глубина в центре гофра.

Выражение (1) удовлетворяет граничным условиям на контуре гофра.

Исходя из выражения для кривизны в поперечном направлении:

$$k_2 = -\frac{1}{r^2} \left( \frac{d^2 w}{d\beta^2} + w \right) \quad (2)$$

На основании (1) получим зависимость для начальной (остаточной) кривизны в поперечном сечении вмятины при отсутствии внутреннего давления:

$$k_{2,00} = \frac{w_0}{r^2} \cos^3 \alpha \cos^3 \beta [3u^2 (1 - 2 \tan^2 u \beta) - 1] \quad (3)$$

Амплитудное значение начального приращения кривизны в окружном направлении:

$$k_{2,00} = \frac{w_0}{r^2} (3u^2 - 1) \quad (4)$$

При действии внутреннего давления начальная форма гофра претерпевает изменение. Форма гофра в этом состоянии определяется радиальными перемещениями, отсчитываемыми от идеальной срединной цилиндрической поверхности трубы  $W_p$ . Второе состояние - исходное при отсутствии внутреннего давления. Оно характеризуется начальными радиальными перемещениями  $W$ . Приращение перемещений  $\Delta w$  будет  $\Delta w = w_p - w$ . Компоненты деформированного состояния нового положения гофра, которое он получил при нагружении трубопровода внутренним давлением определяются условием, которое следует из принципа минимума полной энергии системы. Для определения работы внешних сил  $W_p$  используем, так называемый, «прием С.П. Тимошенко» [1].

Используя соотношения теории упругих тонких оболочек [3] и выполняя все необходимые преобразования, которые следуют из условия принципа минимума полной энергии системы, получаем максимальные деформации в нагруженном и ненагруженном состояниях, также приращение деформаций.

Вычислялась относительная глубина гофра и, исходя из величины этого параметра, принимается решение о дальнейшей эксплуатации данного участка газопровода.

[1]. Seng O.L., Wing C.Y., Seet G. The elastic Analyses of a dent of pressured pipe. -Int.J. Pressure, Vessels and Pipe. // 1989. 39. №5. Pp 369-383.

[2]. Timoshenko S.P. Stability of elastic systems. Moscow: Gostekhizdat, 1955, 368 p.

[3]. Goldenweiser A.L. Theory of Elastic Thin Shells. 2nd ed. M.: Nauka, 1976, 512 p.

*Секция №3*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических направлений развития конструкционного материаловедения.**

**Председатель – Романов А.Н., д.т.н., профессор; Думанский А.М., д.ф.-м..н.;  
Куксенова Л.И., д.т.н.**

**Секретарь – Козлов Д.А., с.н.с., [koslov74@mail.ru](mailto:koslov74@mail.ru)**

# Учет поворота волокон в процессе деформирования Косоугольно-армированных углепластиков

Алимов М.А.

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

alimov\_mike@mail.ru

Деформационное поведение полимерных композиционных материалов в значительной степени определяется углами укладки волокон. При нелинейном деформировании эффект поворота волокон может существенным образом отражаться на компонентах напряженно-деформированного состояния в слоях. Для учета изменения ориентации волокон в процессе деформирования предлагается подход [1], основанный на единственном предположении о том, что деформация однонаправленного слоя вдоль армирования остается линейно-упругой вплоть до разрушения, т.е. нелинейные эффекты в этом направлении считаются минимальными.

В соответствии с этим подходом в случае одноосного растяжения косоугольно-армированных углепластиков соотношения для деформаций и напряжений однонаправленного слоя, справедливые как в линейной, так и нелинейной области деформирования, имеют следующий вид [1]

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta & \sigma_1 &= \frac{\sigma_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta - S_{12} \sigma_x}{S_{11} - S_{12}} \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_x \sin^2 \theta + \varepsilon_y \cos^2 \theta & \sigma_2 &= \sigma_x - \sigma_1 \\ \gamma_{12} &= 2(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cos \theta \sin \theta & \tau_{12} &= -\frac{\sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_1 (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)}{2 \sin \theta \cos \theta} \end{aligned}$$

где  $\sigma_x$  – растягивающее напряжение, приложенное к образцу;  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – деформации в направлениях вдоль и перпендикулярно оси нагружения образца, соответственно;  $\theta$  – угол укладки волокон в процессе деформирования,  $\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \theta^* \left( \frac{1+\varepsilon_y}{1+\varepsilon_x} \right)$ ,  $\theta^*$  – угол укладки волокон в недеформированном состоянии; компоненты матрицы податливости  $S_{11} = \frac{1}{E_1}$  и  $S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$ ,  $E_1$  – модуль упругости слоя в направлении армирования,  $\nu_{12}$  – коэффициент Пуассона.

На рис. 1 приведены зависимости между компонентами напряженно-деформированного состояния однонаправленного слоя образца из углепластика со структурой  $\pm 45^\circ$  при одноосном растяжении с разными скоростями деформирования [2]. Штриховые кривые построены с учетом изменения ориентации волокон, сплошные – без такого учета.

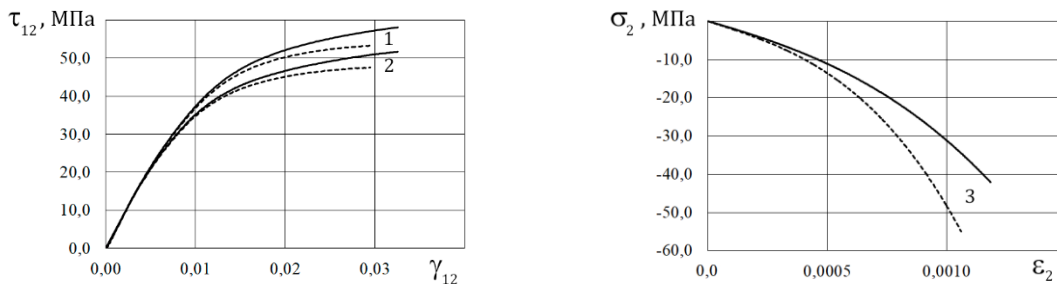


Рис. 1. Зависимости между компонентами НДС однонаправленного слоя при одноосном растяжении образцов из углепластика со скоростями деформирования: 1 –  $9,3 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , 2 –  $9,3 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , 3 –  $9,3 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , определенные с учетом (штриховые линии) и без учета (сплошные линии) поворота волокон

Как видно из рисунка, в нелинейной области при больших деформациях даже относительно небольшое изменение ориентации волокон (в пределах  $1,5 \div 2,5^\circ$ ) приводит к значительному перераспределению напряжений в слоях косоугольно-армированных углепластиков. Фактические значения напряжений однонаправленного слоя, определенные с учетом поворота волокон, существенно отличаются от напряжений, вычисленных без такого учета. Различия не значительны при деформациях сдвига  $\gamma_{12} < 1\%$ .

Эффект поворота волокон следует учитывать, чтобы избежать ошибок при определении компонент НДС однонаправленного слоя косоугольно-армированных углепластиков в нелинейной области деформирования. Особенно это касается напряжений и деформаций в направлении, перпендикулярном армированию, а также касательных напряжений и деформаций сдвига, которые вносят существенный вклад в разрушение связующего в процессе нагружения.

[1]. Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А. Анализ нелинейного поведения композитного материала при одноосном растяжении // Информатизация и связь. № 1 - 2013. - С.69-72.

[2]. Oghihara S., Nakatani H. Modeling of mechanical response in CFPR angle-ply laminates. Proc. of the 19<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM19). Montreal, Canada, 2013, p. 7268-7276.

## Сравнительный анализ критических усилий сжатия и сдвига многоугольных панелей

<sup>1</sup>Азиков Н.С., <sup>2</sup>Зинин А.В.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
nik\_azikov@mail.ru

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Большинство конструкций, формирующих геометрический облик летательного аппарата и его аэродинамическую форму, представляют собой тонкостенные элементы в виде панелей обшивки, форма и размеры которых определяются назначением и конструктивными особенностями летательных аппаратов. Рациональным проектным решением может быть применение композитных слоистых панелей неортогональных в плане, стороны которых соответствуют локальной системе координат конструктивного узла, в состав которого входит обшивка [1,2]. Конкретным применением непрямоугольных панелей могут быть обшивки стреловидных крыльев и хвостового оперения, оболочки и лонжероны летательных аппаратов [2], тонкостенные элементы автомобильной техники, морских судов и объектов строительства [3-6] и др. При эксплуатации панели несущих поверхностей авиационной и ракетной техники подвергаются, в основном, планарным сжимающим и сдвиговым нагрузкам, которые могут привести к развитию чрезмерных деформаций и потере устойчивости [4].

Объектом анализа является композитная панель, имеющую в плане форму произвольного четырехугольника (рис.1). Геометрия панели определяется размерами продольных  $l_1 \geq l_2$  и поперечных  $b_1 \geq b_2$  сторон, углами скоса продольных краев  $\chi_1, \chi_2$ , углом  $\theta$  между левой и правой кромками и углом  $\varphi$  наклона средней оси относительно вертикали. Система координат связана с геометрией четырехугольной панели. Условия закрепления определяются тремя возможными состояниями краев пластины - шарнирное опирание (Ш), защемление (З) и свободное состояние (С). Идентификацию способа закрепления каждого края пластины ведут против часовой стрелки от левой поперечной стороны четырехугольника

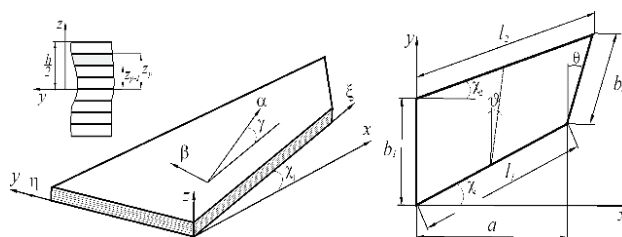


Рис. 1. Геометрические параметры четырехугольной панели

Критические усилия сжатия и сдвига скошенных панелей определяются методом Рэлея-Ритца с аппроксимацией функции перемещений  $w$  балочными функциями Крылова [2,4] для однозначного выполнения граничных условий на контуре панели. Результаты расчета критических усилий сжатия и сдвига панелей в форме параллелограмма (рис.2) показали, что увеличение угла скоса при действии на панель сжимающих усилий приводит к увеличению критических усилий сжатия  $T_c^*$  в любом случае закрепления краев. Максимальной устойчивостью обладает панель с защемленными кромками (рис.2а). Нагрузки потери устойчивости скошенных пластин при действии в плоскости положительных сдвиговых усилий, которые приводят к увеличению угла скоса, ниже показателей при сдвиге отрицательной нагрузкой (рис.2б, 2в).

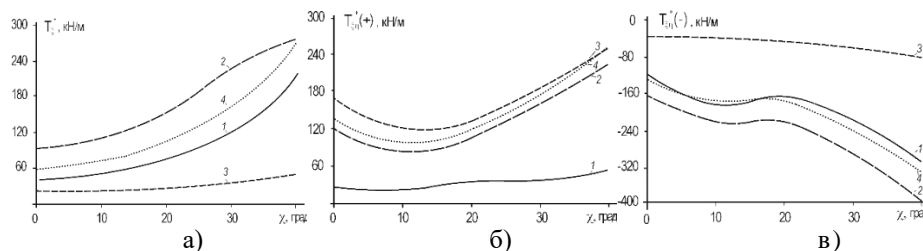


Рис. 2. Зависимость критического усилия потери устойчивости от угла скоса:  
а) сжатие; б) положительный сдвиг; в) отрицательный сдвиг  
1 – Ш-Ш-Ш-Ш; 2- З-З-З-З; 3 – С-Ш-С-Ш; 4 – Ш-С-Ш-С

В таблице представлено сравнение расчетных коэффициентов устойчивости для симметричных трапециевидных панелей с результатами конечно-элементного моделирования, выполненного в работе

[5]. Установлено заметное отличие значений коэффициентов устойчивости, полученных сравниваемыми методами, что связано, по мнению авторов, с особенностями выполнения граничных условий на контуре панелей.

Таблица 1. Коэффициенты устойчивости симметричных трапециевидных панелей

Схема закрепления	$\varphi=90^0$		$\varphi=75^0$		$\varphi=60^0$		$\varphi=45^0$	
	Метод Релея	МКЭ [5]	Метод Релея	МКЭ [5]	Метод Релея	МКЭ [5]	Метод Релея	МКЭ [5]
Ш-Ш-Ш-Ш	4,000	4,000	4,038	4,393	4,774	5,869	5,895	9,846
З-З-З-З	10,359	10,074	10,144	10,835	9,210	13,538	9,863	20,105
Ш-З-Ш-З	7,720	7,691	7,167	8,302	7,226	10,502	8,043	15,916
З-Ш-З-Ш	6,973		6,104		5,849		6,281	
Ш-С-Ш-С	2,716	0,995	2,464	1,069	2,239	1,522	2,070	2,815
С-Ш-С-Ш	2,219		2,433		2,419		1,508	
З-С-З-С	5,713	3,019	4,752	3,919	3,981	5,620	3,516	8,145
С-З-С-З	3,878		3,940		4,217		4,630	

Влияние кривизны поверхности исследовано на примере пологих скошенных панелей, для которых соотношения продольных размеров и радиусов кривизны не менее 1/5 [6-8]. Отличие от плоской структуры учитывается введением в условия равновесия и геометрические соотношения кривизны пологих панелей  $K_\xi = 1/R_\xi$  и  $K_\eta = 1/R_\eta$ , где  $R_\xi, R_\eta$  - радиусы кривизны срединной поверхности в направлениях  $\xi$  и  $\eta$ . Результаты расчетов показывают, что увеличение кривизны косоугольных панелей  $1/R_\eta$  положительно сказывается на их устойчивом поведении при сжимающих и сдвиговых нагрузках (рис.3). Так, для радиуса кривизны пологой панели  $R_\eta = 15$  м и  $l = 1$  м для больших углов скоса  $\chi \geq 30^0$  критическая нагрузка при сжатии  $T_\xi^*$  в 3,5...3,7 раза, а  $T_{\xi\eta}^*$  при сдвиге - в 2,6...3,1 раза превышает соответствующие критические значения плоской панели, а при  $R_\eta = 5$  м - уже в 9,3...9,5 раза при сжатии и в 5,7 ...8,1 при сдвиге. Установлено, что значения критических усилий пологих панелей с малыми углами скоса ( $\chi < 20^0$ ) практически не отличаются от соответствующих показателей для прямоугольных конструкций на всем интервале радиуса кривизны.

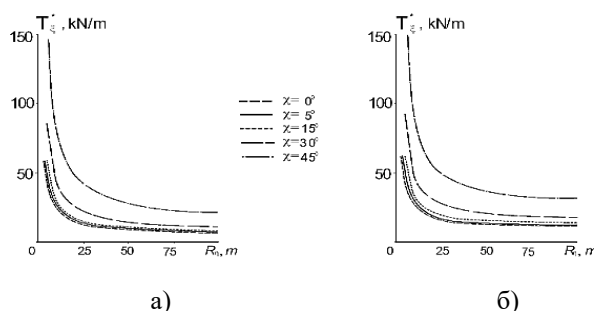


Рис.3. Зависимости критического усилия при осевом сжатии от радиуса кривизны панели для различных углов скоса при  $l=1$  м: а) Ш-Ш-Ш-Ш ; б) З-З-З-З

- [1]. Reddy J.N. Mechanics of laminated composite plates and shells. Theory and analysis, (2nd ed). New York, CRC Press, 2004. – 831p.
- [2]. Azikov N. S., Saifullin I. S., Zinin A. V., Gairadzhi Y. V. Strength under Supercritical Deformation of Skew Composite Panels // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Vol. 50, No. 5. – P. 430-437.
- [3]. Yas M.H., Bayat A., Kamarian S., Malekshahi A., Song J.I. Buckling Analysis and Design Optimization of Trapezoidal Composite Plates under Hygrothermal Environments // Composite Structures. – 2023, v. 315(3): 116935.
- [4]. Azikov N.S., Zinin A.V. Analysis of free vibrations of a skew orthotropic composite panel // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. – Vol. 51, No. 5. – P. 406-417
- [5]. Karami G., Malekzadeh P. Static and stability analyses of arbitrary straight-sided quadrilateral thin plates by DQM // International Journal Solids Structures. 2002, v.39(19), pp.4927–4947.
- [6]. Wang C. M., Liew K. M., Alwis W. A. Buckling of Skew Plates and Corner Condition for Simply Supported Edges // Journal of Engineering Mechanics, 1992, v.118(4), pp.651–662.
- [7]. York C.B., Williams F.W. Buckling analysis of skew plate assemblies, classical plate theory results incorporating Lagrangian multipliers // Computer and Structures.1995, v. 56, pp.625-635.
- [8]. Azikov N., Zinin A., Gaidarzi Y. Buckling and free vibration analysis of skew shallow composite panel // AIP Conference Proceedings – 14 June 2023; v.2507 (1): 040013 – doi:10.1063/5.0109355.

## **Элементная база средств технологического обеспечения деталей на модульном уровне**

**Базров Б.М.**

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
modul\_lab@mail.ru

Средствами технологического обеспечения (СТО) производства деталей являются технологические процессы, станки, станочные приспособления, инструмент, контрольно-измерительные устройства, разнообразие которых теоретически неограниченно и продолжает расти.

При проектировании технологических процессов изготовления деталей технолог выбирает станки и технологическую оснастку: станочные приспособления, инструмент, контрольно-измерительные средства или даёт задание на их создание.

Таким образом имеет место прямая связь между технологической операцией и СТО.

При проектировании СТО широко используются их элементы, которые представлены в многочисленных литературных источниках. Это затрудняет их поиск и часто используются элементы не лучшего качества. Всё это повышает трудоёмкость проектирования технологической оснастки и снижает её качество.

В связи с этим актуальной задачей является построение элементной базы средств технологического обеспечения (ЭБТО).

Первой задачей в её построении является выбор уровня элемента технологического обеспечения: станка, приспособления, инструментальной наладки и контрольно-измерительного устройства.

Чем выше уровень предмета производства, тем выше уровень СТО, тем большим числом характеристик они описываются, тем теоретически выше их разнообразие и тем больше размер элементной базы и тем сложнее её построение, связанное с поиском информации о СТО. При таком построении ЭБТО будет увеличиваться число элементов, близких к искомому элементу, так как они описываются большим числом характеристик и тем сложнее выбирать требуемый элемент.

В этой связи целесообразно выбирать в качестве элемента ЭБТО элемент низшего уровня. Таким элементом является деталь, но и она описывается большим числом характеристик: видом геометрии поверхностей, различием их относительного положения, размерами, уровнем точности.

В связи с этим предлагается в качестве элемента ЭБТО принять модуль поверхностей (МП) детали [1], представляющий собой сочетание поверхностей, с помощью которого деталь выполняет соответствующую функцию. Главным достоинством МП является его ограниченное множество – двадцатью шестью видами МП, из которых четырнадцать видов базирующих МП (МПБ) и по шесть видов рабочих МП (МПр) и связующих МП (МПС). Каждый из видов МП имеет несколько конструктивных решений, которые описываются соответствующим небольшим числом характеристик. С помощью этого ограниченного множества МП можно представить любую деталь в виде совокупности соответствующих МП из этого множества.

Таким образом, при построении ЭБТО в качестве элемента предмета производства предлагается принять МП.

Средствами технологического обеспечения МП на модульном уровне являются: модуль технологического процесса (МТО) изготовления МП, модуль станка (МО), модуль станочного приспособления (МПр), модуль инструментальной наладки (МИ) и модуль контрольно-измерительного устройства (МКИ) контроля МП.

Отсюда следует, что в основу построения ЭБТО на модульном уровне должна быть положена схема связей между МП и модулями средств его технологического обеспечения.

Наличие такой ЭБТО является своего рода почтовым ящиком, с помощью которого можно фиксировать все технологические решения и, тем самым, способствовать их широкому внедрению. Кроме того, наличие ЭБТО позволяет анализировать состояние технологического обеспечения и определять дальнейшее направление их развития.

[1]. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с., ил.

# Критерии оценки изменения долговечности при одно- и двухчастотных режимах нагружения

Гаденин М.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
safety@imash.ru

Для высоконагруженных технических систем, испытывающих вибрационные нагрузки, в качестве критерия достижения предельного состояния по прочности и ресурсу принимается сопротивление циклическому разрушению с учетом роли статической, циклической и вибрационной составляющих общей нагруженности. Это ставит задачу анализа одновременного накопления как статических, так и много- и малоцикловых усталостных повреждений в их взаимодействии [1, 2].

Выполненные экспериментальные исследования показали, что при двухчастотном нагружении по сравнению с равным по суммарным амплитудам циклической деформации одночастотным нагружением кривые малоциклового усталости сталей 12Х2МФА и Х18Н10Т для жесткого двухчастотного режима (рис. 1,а) при двух уровнях высокочастотных деформаций  $e_{a2}=0,035\%$  (кривые 2) и  $e_{a2}=0,07\%$  (кривые 3) и соотношении частот  $f_2/f_1=1500$ , расположены значительно левее одночастотных кривых малоциклового усталости (кривые 1), что свидетельствует о значительном снижении долговечности материала.

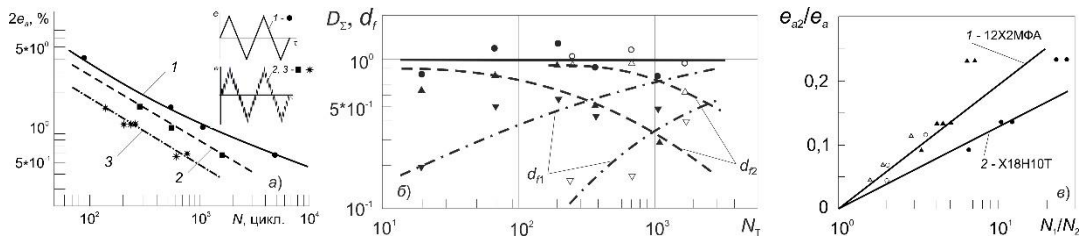


Рис. 1. Кривые малоциклового усталости (а), суммирования повреждений (б) и относительного снижения долговечности (в) при двухчастотном нагружении

На основе полученных опытных данных показано, что накопленное по числу основных низкочастотных циклов  $n$  повреждение  $D_\Sigma$  до образования трещины  $N_T$  составит интегральную сумму (первый член выражений (1)) усталостных  $d_{f1}$ ,  $d_{f2}$  и статических  $d_s$  составляющих повреждения (рис. 1,б), а относительное снижение долговечности по рис. 1,в определится вторым членом выражений (1)

$$D_\Sigma = \int_0^{N_T} \frac{1}{N[e_a(n), t, \tau]} dn + \int_0^{N_{T2}} \frac{1}{N_2[e_{a2}, t, \tau, r(n_2)]} dn_2 + \int_0^{N_T} \frac{e_n}{\varepsilon_{1\tau}} dn = 1,0, \quad N_1 = N_2(f_2/f_1)^{k_N(e_{a2}/e_a)} \quad (1)$$

Анализ условий достижения предельных состояний может быть выполнен также и на основе энергетических критериев и рассмотрения баланса критических уровней накопленной в материале повреждающей энергии (рис. 2,а), состоящей из приложенной механической энергии  $\bar{A} = \bar{E} + \bar{Q}$  и выделяющейся при этом тепловой энергии  $\bar{Q}$  в результате саморазогрева материала (рис. 2,б), а  $\bar{E}$  - удельная энергия, поглощенная материалом при его деформировании. Режимы нагружения и регистрируемые диаграммы деформирования, характеризующие затраченную механическую энергию, приведены на рис. 2,в.

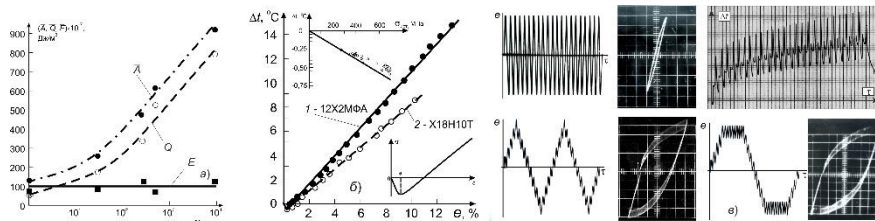


Рис. 2. Кривые составляющих энергии деформирования (а), температурных зависимостей (б) и диаграммы деформирования (в) в рассматриваемых условиях одно-, и двухчастотного режимов нагружения

Таким образом, оценка повреждаемости и долговечности конструкционных материалов при одно- и двухчастотных режимах нагружения может быть выполнена на основе анализа диаграмм циклических упругопластического деформирования по соответствующим деформационным критериям суммирования повреждений, а также с использованием энергетического подхода с выделением составляющих затраченной на процесс деформирования механической энергии, выделившейся в этом процессе тепловой энергии и ответственной за разрушение энергии, поглощенной материалом,

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00769).

[1]. Гаденин М.М. Исследование закономерностей сопротивления деформированию и накопления повреждений при нерегулярном малоцикловом нагружении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. №11. С. 55-63.

[2]. Исследования и обоснование прочности и безопасности машин. / Под. ред. Н.А.Махутова, Ю.Г.Матвиенко, А.Н.Романова. К 300-летию Российской академии наук, 85-летию Института машиноведения РАН. – М.: МГОФ «Знание», 2023. – 832 с.



# Влияния релаксационных процессов на накопление повреждений и долговечность конструкционных материалов при малоцикловом нагружении

Гаденин М.М., Романов А.Н.

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

e-mail: safety@imash.ru

Исследование характера изменения циклических упругопластических деформаций в процессе малоциклового нагружения является основой для установления закономерностей накопления повреждений в материале на основе деформационно-кинетического критерия разрушения. При этом диаграмма деформирования в координатах «напряжение – деформация» в полной мере характеризует процесс накопления повреждений в материале [1-3]. На форму и характер изменения диаграммы циклического деформирования существенное влияние оказывает наличие в циклах временных выдержек на экстремумах напряжений и наложение на эти выдержки их дополнительных составляющих (пульсаций) с более высокими частотами. В этих случаях к размаху циклической пластической деформации от активного нагружения  $\delta_a$ , при регулярном цикле нагружения (рис. 1,а) добавляется деформация, связанная с процессами релаксации и циклической ползучести  $e_\tau$  в течение выдержки (рис. 1,б-е), которая обуславливает увеличение пластической деформации в цикле  $\delta$  до величины их суммы  $\delta = \delta_a + e_\tau$ .

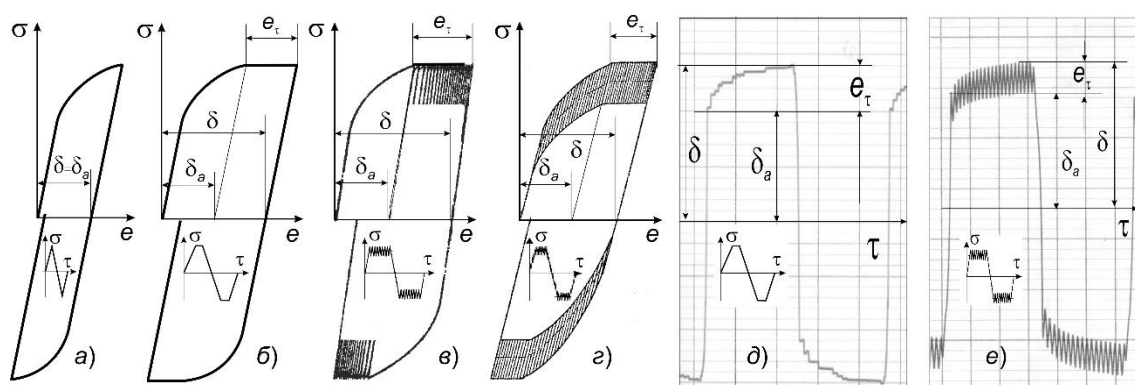


Рис. 1. Схемы диаграмм циклического упругопластического деформирования при различных формах циклов

Детальный анализ характера проявления и развития деформации  $e_\tau$ , связанной с процессами релаксации и ползучести во время выдержек при трапецидальной форме цикла, показывает, что, как видно из диаграммы временной развертки развития деформации  $e_\tau$  (рис. 1,д), с течением времени  $\tau$  интенсивность роста деформации  $e_\tau$  снижается. На рис. 1,в,з,е приведены диаграммы деформирования при двухчастотном режиме нагружения, когда во время выдержки на максимальном и минимальном уровнях напряжений накладывается составляющая их пульсаций с частотой, большей частоты основного нагружения. В этом случае, как и для случая с выдержками при постоянных  $\sigma_{a \max}$ , наблюдается подобный механизм развития  $e_\tau$ , однако реализуемый с меньшей интенсивностью и значениями деформации  $e_\tau$ .

Результаты выполненных исследований показывают, что включение в циклы нагружения временных выдержек как без наложения в течение них на экстремумы максимальных напряжений дополнительных пульсаций, так и при их наличии, существенно влияет на величину и характер кинетики циклической пластической деформации  $\delta$ , причем, в основном, за счет проявления деформации  $e_\tau$  в процессе протекания релаксации напряжений и эффектов ползучести.

Таким образом показывается, что деформация от релаксации напряжений и циклической ползучести  $e_\tau$ , увеличиваясь с числом циклов нагружения, вносит существенный вклад в характер изменения и величину полной циклической пластической деформации  $\delta$  (ширины петли пластического гистерезиса). Рост размахов циклической пластической деформации за счет прогрессирующей в течение выдержек дополнительной пластической деформации согласно деформационно-кинетическому критерию увеличивает повреждаемость материала в процессе циклического упругопластического деформирования, что снижает циклическую долговечность и приводит к уменьшению числа циклов до разрушения рассматриваемой в связи с подобными циклами эксплуатационного нагружения конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00769).

[1]. Романов А.Н. Локальное повреждение конструкционных материалов при малоцикловом нагружении / Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2020). Сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате. 2020. С. 233-236.

[2]. Гаденин М.М. Особенности кинетики диаграмм циклического упругопластического деформирования при наличии в циклах выдержек и наложении на них переменных напряжений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. №12. С.46-53.

[3]. Исследования и обоснование прочности и безопасности машин. / Под. ред. Н.А.Махутова, Ю.Г.Матвиенко, А.Н.Романова. К 300-летию Российской академии наук, 85-летию Института машиноведения РАН. – М.: МГОФ «Знание», 2023. – 832 с.

# Цифровые инструменты в оценке долговечности при переменном нагружении

Гадолina И.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
gadolina@mail.ru

## Цель

Охарактеризовать основные инструменты, используемые при оценке ресурса при многоциклового усталости металлов и композитов, призванных способствовать уточнению оценки долговечности как на стадии проектирования, так при прогнозировании остаточного ресурса. Перечисленные в докладе инструменты позволят перейти к эксплуатации по состоянию и снизить риски, связанные с преждевременным выходом из строя деталей и конструктивных элементов. Методы решения задач усталости с применением цифровых технологий изложены, например, в [1].

## Актуальность

В инженерной практике существует множество задач, которые можно успешно решить с помощью современных математических численных методов. Кластерный анализ, нейронные сети, нечеткие множества, цифровые двойники, планирование научных экспериментов, анализ цифровых изображений — вот актуальные применения таких методов. Несмотря на прорывы, сделанные в последние десятилетия, остается еще много нерешенных проблем в оценке долговечности при переменных нагрузках. Для оптимизации научных результатов также необходимы усовершенствования численных и физических экспериментальных методов. Большинство инженерных задач имеют тенденцию к возрастанию сложности и требуют получения решения в сжатые сроки. В связи с этим актуальна потребность разработки цифровых методов с применением инструментов искусственного интеллекта.

## Инструменты и их применение

Основные цифровые инструменты и их применение приведены в Таблице 1. Перечисленные инструменты были с успехом применены при решении проблем прочности металлических изделий и композитных образцов. На Рис.1 схематично показано рассмотрение проблемы кластерного анализа по временной реализации нестационарного случайного процесса. На рисунке обозначены три основные характеристики: эффективная частота процесса  $f$ , среднее квадратическое отклонение СКО и максимальная амплитуда  $S_{max}$ . Отрезки реализации отчетливо (видно на рисунке) образуют три кластера.

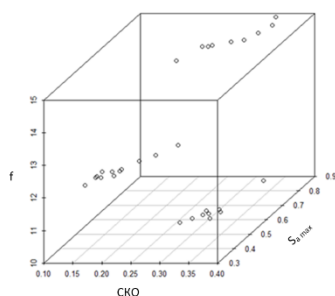


Рис.1. Кластерный анализ по реализации случайного процесса для построения блока нагружения [1]

Применение подобного анализа позволит научно обосновать построение блока нагружения [1], используемого в дальнейшем при испытаниях и расчетах.

Таблица 1. Цифровые инструменты

Номер инструмента	Инструмент	Применение, результат
1	Кластерный анализ	Выделение значимо различающихся режимов в общей записи эксплуатационного нагружения. (См. также Рис.1.)
2	Цифровые двойники	Построение модифицированной кривой усталости (гармоническое нагружение - цифровой двойник) по данным о наработках при нерегулярном нагружении (физический двойник)
3	Нечеткие данные	Дополнение информации о наработках важной информацией о состоянии цензурированных образцов (промышленная томография)
4	Метод корреляции цифровых изображений	Получены поля деформаций. Выводы соответствуют рейтингам, предоставленным по обработке томографических изображений [3]
5	Статистический бутстреп	Построены доверительные интервалы для многократно цензурированных справа выборок по отказам деталей транспортного машиностроения

## Выводы

Современные вычислительные возможности компьютеров и новые математические методы позволяют перевести расчеты долговечности при переменном нагружении на качественно новый уровень по части прогноза эксперимента и позволит перейти к эксплуатации по состоянию.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>

[1]. S. Chatterjee and A. Keprate, "Predicting Remaining Fatigue Life of Topside Piping Using Deep Learning," 2021 International Conference on Applied Artificial Intelligence (ICAAI), Halden, Norway, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAAI49758.2021.9462055.

[2]. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М., Машиностроение, 1993. 364 с.

[3]. Разумовский И.А., Одинцев И.Н., Плугатарь Т.П. Методы экспериментально-расчетного исследования остаточных напряжений в элементах конструкций /Актуальные проблемы механики. 2022. Том. 11. С. 116-119.

## Определяющие соотношения наследственного типа в механике композитов

*Думанский А.М.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
aldumans@rambler.ru

Несмотря на очевидные преимущества использования полимерных композиционных материалов в качестве силовых элементов конструкций, имеются и существенные недостатки, связанные с эффектами анизотропии, накоплением необратимых повреждений, вызванных слабым сопротивлением на сдвиг в плоскости слоя, приводящим к расслоениям. Наличие полимерной матрицы приводит к заметному проявлению временных свойств в композитах. Свойства наследственности в материалах проявляются при ползучести, релаксации, скоростном, циклическом нагружении, динамических эффектах и пр. Взаимосвязь механических свойств материалов при разных воздействиях при некоторых ограничениях может быть установлена с помощью определяющих уравнений наследственного типа. Тип и параметры входящих в определяющие соотношения функций ползучести и релаксации определяются реакцией материала на внешние воздействия. Подобно дифференциальным уравнениям линейной вязкоупругости в интегральных соотношениях наследственного типа также имеет место набор материальных функций, позволяющих их использование при разных режимах нагружения. Применение ядер резольвентного типа позволило использовать математический аппарат, заложенный в трудах Вольтерра и развитый во второй половине XX века. В частности, Работновым Ю.Н. была разработана алгебра резольвентных операторов. С помощью процедуры умножения операторов с ядрами Абеля получена резольвента, представляющая дробно-экспоненциальную функцию Работнова [1].

Дальнейшее развитие теории наследственной упругости получила в связи ее обобщением, позволяющим описывать физическую нелинейность материала. Наиболее удобным и практичным оказалось нелинейное уравнение Работнова, в котором физическая нелинейность могла быть учтена путем коррекции модуля по кривой мгновенного деформирования.

Анализ анизотропии наследственно упругих свойств композитов можно выполнять по результатам испытаний на одноосное нагружение образцов, вырезанных под разными углами к направлению армирования. По результатам испытаний можно отметить следующие закономерности. При нагружении вдоль направления армирования и поперек направления армирования временной зависимостью свойств можно пренебречь. Основным источником реологических и физически нелинейных свойств являются свойства при внутрислойном сдвиге. Одновременно учесть реологию и физическую нелинейность в много направленном пакете сложно с математической точки зрения. Поэтому, можно разделить использование определяющих соотношений, предполагая, что при высоком уровне кратковременно действующих напряжений превалирующую роль будет играть физическая нелинейность, а при длительном воздействии умеренных нагрузок перераспределение напряжений будет происходить за счет наследственных свойств. Используя предложенный выше подход и гипотезы теории слоистых пластин, строятся определяющие соотношения слоистых пластин. Непосредственное использование уравнений анизотропной теории упругости и операторное выражение для входящих в него упругих характеристик в некоторых случаях позволяет описать совместный учет реологических и физически нелинейных свойств [2]. Пример использования определяющего соотношения наследственного типа, позволяющего описывать анизотропию деформационных свойств однонаправленного углепластика при скоростном нагружении рассмотрен в [3].

На основе матричных алгоритмов и алгебры резольвентных операторов разработаны методы построения определяющих соотношений, позволяющие определять реологические и физически нелинейные свойства слоистых пластин. С помощью соотношений, выражающих функцию от матрицы, были получены явные выражения матричной резольвенты [4]. Интегральное влияние временных свойств может оцениваться как возмущение операторных матриц жесткости и податливости.

Предложенный подход позволяет описывать механическое поведение слоистых пластин из полимерных композиционных материалов с произвольной укладкой волокон в слоях при разных режимах нагружения, включая изменяющиеся во времени нагрузки или перемещения.

Операторная форма определяющих соотношений позволяет на основе принципа Вольтерра их использование при решении краевых задач для тонкостенных конструкций из композитов.

[1]. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 384с.

[2]. Dumansky A.M., Liu Hao Analysis of anisotropy of time-dependent and nonlinear properties of unidirectional CFRP // Advances in Composite Science and Technology IOP Publishing IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 683.

[3]. A. Dumansky, M. Alimov and A. Sanchez Bolinches, Analysis of nonlinear time-dependent properties of carbon fiber reinforced plastic under off-axis loading, Materials Today: Proceedings.

[4]. Dumansky A., Tairova L. The prediction of viscoelastic properties of layered composites on example of angle-ply carbon reinforced plastics/ Proceedings of the World Congress on Eng-ng. 2007, Vol II. London, U.K. pp 1346-1351.

## Конструкционные материалы из лунного реголита: отработка технологии селективного лазерного сплавления

Ким А.А., Лысенко А.М., Томилина Т.М.

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

Освоение Луны, создание на ее поверхности соответствующей инфраструктуры приобретает важное значение. Одной из задач в этом направлении является разработка технологий, позволяющих создавать строительные элементы и материалы на месте из природного сырья – поверхностного лунного грунта (реголита). Среди потенциально реализуемых рассматриваются аддитивные технологии, особенно - технология селективного лазерного сплавления (СЛС) (см., например, обзор [1]). СЛС-технология разрабатывалась для изготовления изделий из порошковых материалов, а лунный реголит является таким естественным материалом. При проведении исследований в земных условиях используются имитаторы лунного реголита, свойства которого хорошо изучены – это сложный по химическому составу и сильно неоднородный по морфологии материал с неравномерным распределением частиц по размерам (рис. 1а). Для СЛС-технологий, которые работают со специально приготовленными порошками сферической формы, для такого материала требуется адаптация к существующим установкам.

В предыдущих исследованиях авторов [2,3] была показана принципиальная возможность получения образцов из имитатора реголита на СЛС-установке Concept Laser Mlab Causing-100. Использовался имитатор, изготовленный на основе измельченного лабрадорита с распределением частиц по размерам как у природного грунта, рис. 1а (предоставлен ГЕОХИ). При этом было установлено, что порошковая композиция с фракциями 0-100 мкм не позволяет нанести равномерный слой на платформу построения, что в дальнейшем приводит к плохому сплавлению образцов. Исследования порошка на текучесть показали, что наличие частиц с размерами <50 мкм ухудшает эту характеристику, поэтому было решено приготовить две порошковые композиции с выделенными фракциями 50-100 мкм и 100-140 мкм путем просеивания. Распределение частиц по размерам показано на рис. 2а.

В данной работе представлены результаты исследований параметров сплавления тестовых образцов заданной геометрии (рис.1б) и их свойств, таких как твердость и плотность (рис.2).

Исследования проводились в три этапа:

- Подготовка и исследование свойств исходных порошковых композиций, подбор оптимального материала подложки, позволяющей проводить сплавление порошка в широком диапазоне режимов, назначение геометрии тестовых образцов.
- Экспериментальное определение рабочего диапазона режимов сплавления, в котором полученные образцы имеют заданную геометрию и плотность. Исследование влияния энергии сплавления на свойства тестового образца.
- Анализ свойств тестовых образцов – измерение плотности, пористости и прочности.

Как и в предыдущих исследованиях для лабораторного эксперимента была выбрана промышленная СЛС-установка небольшой мощности Concept Laser Mlab Causing с непрерывным итербиевым лазером с максимальной мощностью 100 Вт и диаметром пучка 50 мкм. Имитатор реголита был приготовлен на основе измельченного габбро-диабазы, у которого, как и у лабрадорита, химический состав (определяющий параметр при сплавлении) близок к оригиналу; также были приготовлены две порошковые композиции с соответствующим распределением частиц по размерам (рис.1а). Материал подложки – керамика.

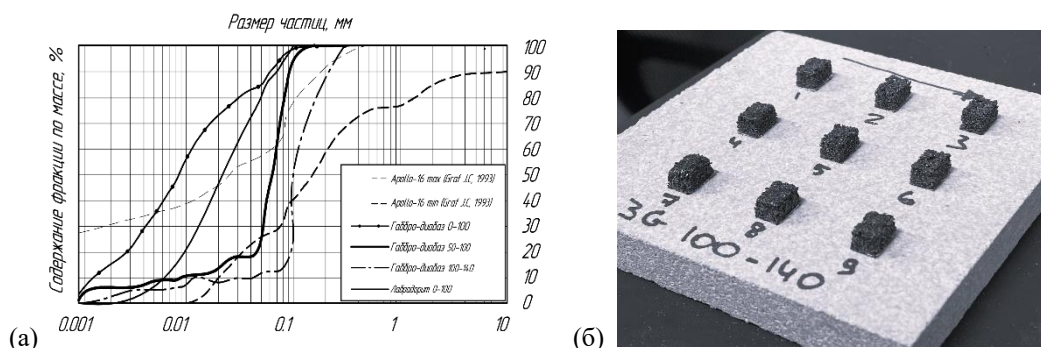


Рис. 1. Гранулометрический состав реголита и порошковых композиций (а); тестовые образцы на подложке (б).

На следующем этапе был определен рабочий диапазон режимов сплавления, на котором получены образцы заданной геометрии: мощность лазера  $P$  изменялась в диапазоне 60-100 Вт, скорость сканирования  $v$  - 125-175 мм/с, шаг сканирования  $H=190$  мкм и толщина слоя  $h=150$  мкм не менялись. Сплавление проводилось в инертной среде ( $N_2$ ) при комнатной температуре. Форма образцов задавалась в виде

параллелепипеда с размерами  $5 \times 7,5 \times 6$  мм<sup>3</sup> для их дальнейшего исследования на прочность. Внешний вид напечатанных образцов на подложке представлен на рисунке 1б; каждому образцу соответствуют свои значения параметров ( $P, v$ ). Большинство образцов имеют заданную геометрию. При некоторых значениях ( $P, v$ ), соответствующих большему значению подводимой энергии  $E$  ( $E = P/vHh$ ), наблюдалось искажение заданной геометрии (образец №7 на рис.1б).

В ходе анализа у сплавленных образцов измерялись истинная и объёмная плотности. Истинная плотность определялась двумя методами: пикнометрии (на анализаторе «Densi-100») и гидростатического взвешивания (на аналитических весах «Госметр» АДВ-200). Оба метода дали результаты, сходящиеся в пределах погрешностей. Объёмная плотность определялась как отношение массы образца к его объёму, размеры которого измерялись микрометром. Зависимости истинной и объёмной плотности от удельной энергии сплавления  $E$  представлены на рисунке 2а. По графику видно, что с увеличением подводимой энергии увеличивается как объёмная плотность, так и истинная плотность образцов, что согласуется с зарубежными работами [4]. Рост объёмной плотности обуславливается тем, что с увеличением подводимой энергии расплавляется больше исходного порошка и уменьшается количество пор. Незначительный рост истинной плотности по сравнению с объёмной связан с тем, что изменение истинной плотности обуславливается только внутренними закрытыми порами, в то время как объёмная плотность включает и открытые поры.

Аналогичные исследования проводилась и для композиции порошка габбро-диабазы 50-100 мкм. Для примера на рисунке 2б представлены результаты измерения твердости тестовых образцов по Виккерсу в зависимости от удельной плотности энергии процесса сплавления с указанием стандартной погрешности измерений. Так как поверхность образца имела поры, измерение твердости проводилось в 10-ти точках и определялось среднее значение. На каждом образце было получено минимум 4 отпечатка с хорошим видимым следом. Видно, что твердость образцов не меняется сильно в выбранном диапазоне режимов сплавления и среднее значение составляет 720 НВ. Во всех испытаниях нагрузка составляла 0,1 кгс, время выдержки под нагрузкой 10 с.

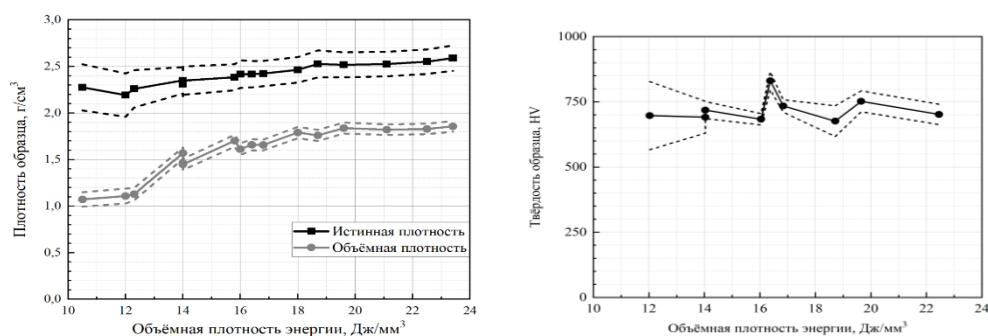


Рис. 2. Зависимости плотности образцов композиции 100-140 мкм и твердости от объёмной плотности энергии.

В результате работы было получено более 150 тестовых образцов на разных режимах сплавления с различными свойствами. Было установлено, что увеличение подводимой энергии приводит к увеличению плотности образцов, но в ряде случаев к уменьшению точности геометрии. При недостаточной энергии происходит несплавление частиц порошка, и структура образца получается рыхлой. Была определена рабочая зона по плотности подводимой энергии – в диапазоне 14 - 25 Дж/мм<sup>3</sup>, в рамках которой получают образцы с точностью геометрических размеров > 80%. Твердость поверхности образцов, напечатанных в выбранном диапазоне режимов сплавления сильно не изменяется. Результаты механических испытаний находятся в стадии обработки и будут представлены в докладе. Исследования для определения критерия, на основе которого может быть получен конструкционный материал из лунного реголита для использования в качестве строительного элемента на месте будут продолжены.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 22-22-00840).

- [1]. Farries K.W., Visintin P., Smith S. T. et al. Sintered or melted regolith for lunar construction: state-of-the-art review and future research directions. Construction and Building Materials. 2021. 296. 123627.
- [2]. Ким А.А., Лысенко А.М., Томила Т.М. Получение изделий из лунного реголита с помощью аддитивных технологий. Научные труды 6-ой международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (Живком-2022). 2022. С.151-154.
- [3]. Томила Т.М., Ким А.А., Лисов Д.И., Лысенко А.М. Эксперимент «Лунный-принтер» по лазерному сплавлению лунного реголита в космическом проекте «Луна-грунт». Космические исследования. 2023. Т.61, № 4. С. 311-321.
- [4]. Goulas A., Binner J.G.P., Engstrom D.S. et al. Mechanical behaviour of additively manufactured lunar regolith simulant components. Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications. 2018. P. 1–16.

# Технологические особенности формирования параметров качества диффузионного слоя на поверхности стали марки 12ХН3А при микродуговом воздействии

Китаев Н.И. Пичхидзе С.Я.

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия  
kitaev-1995@mail.ru

## Цель

Исследовать влияние микродугового воздействия в предлагаемой хромосодержащей обмазке на структурно-фазовое состояние, микротвёрдость и износ поверхностных слоёв хромоникелевой стали марки 12ХН3А.

## Объекты и методы исследования

Объектом исследования является структурно-фазовое состояние и механические характеристики (шероховатость, микротвёрдость, износ) стали марки 12ХН3А после её диффузионного насыщения в предлагаемой хромосодержащей обмазке. Исследование структурно-фазового состояния осуществляли методами РЭМ и ЭДРА. Значения шероховатости поверхности измеряли профилографом-профилометром Mitutoyo Surftest SJ-410, а значения микротвёрдости поверхности микротвердомерами «HVS-1000» и «ПМТ-3М». Износ исследовался на настольном токарно-винторезном станке «Витязь 1Н628В».

## Результаты и их обсуждение

Для достижения заявляемого результата на поверхность подложки наносится слой (~ 1 мм) хромосодержащей обмазки [1, 2], в составе: 50 мас. % соли уксусной кислоты и 2-моноэтаноламина в соотношении 1:1, а также 25 мас. % порошка сажи и 25 мас. % оксида хрома, вступающей во взаимодействие с материалом подложки при микродуговом воздействии с образованием химических соединений, обладающих нужным набором физико-механических свойств.



Рис. 1. Рентгенограмма стали марки 12ХН3А, где: (а) в исходном состоянии, (б) после диффузионного насыщения в синтезированной хромосодержащей обмазке под действием микродугового нагрева

Анализ рентгенограммы структурно-фазового состояния стали марки 12ХН3А «рис. 1» показал, что в структуре исходной стали содержится одна фаза железа:  $\alpha$ -Fe с ОЦК решёткой. После диффузионного насыщения в структуре поверхностного слоя образуются рефлексы, включающие карбиды хрома, железа и никеля:  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Ni}_3\text{C}$ .

Предварительно, в программном комплексе «ELCUT 5.1», проведено моделирование тепловых процессов, возникающих в результате диффузионного хромирования микродуговым воздействием, и определены рациональные значения силы тока, температуры и времени выдержки. В «табл. 1» показано влияние силы тока, температуры и времени выдержки на значения шероховатости и микротвёрдости поверхности с Cr-слоем.

Таблица 1. Значения шероховатости и микротвёрдости образца с Cr-слоем при различных режимах микродугового воздействия

Образец	Сила тока ( $I_d$ , А)	Температура ( $T$ , °С)	Время выдержки ( $t$ , мин)	Шероховатость, ( $R_a$ ) / класс	Микротвёрдость, $\text{HV}_{0,2\text{H}}$
исх.	-	-	-	0,320 / 9	200±30
1	2,5	950 ± 30	4,5 ± 0,5	0,443 / 8	380±30
2	3,0	1100± 30	4,5 ± 0,5	0,447 / 8	415±30
3	3,6	1325 ± 30	4,5 ± 0,5	0,449 / 8	410±30
4	2,5	950 ± 30	9,5 ± 0,5	0,441 / 8	450±30
5	3,0	1100± 30	9,5 ± 0,5	0,445 / 8	530±30
6	3,6	1325 ± 30	9,5 ± 0,5	0,452 / 8	550±30

Анализ данных «табл. 1» показывает, что диффузионное хромирование микродуговым воздействием оказывает незначительное снижение класса шероховатости поверхности с 9 до 8, а максимальной микротвёрдостью обладают слои, полученные при более высокой температуре и времени выдержки. В среднем микротвёрдость увеличилась в 3 раза. Испытания на износ стального образца с Cr - покрытием показали повышенную в 3 раза износостойкость к истиранию в сравнении с исходным образцом.

[1] Гаврилов В. П. Особенности составов рабочих смесей, характеристика процесса диффузионного хромирования и его разновидностей. – 2015.

[2] Диффузионное насыщение сталей из насыщающих обмазок / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, Т. А. Бруль // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 4. – С. 38.

## Применение покрытий на основе меди для повышения эксплуатационных свойств высоконагруженных трибосопряжений

Козлов Д.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
koslov74@mail.ru

Представлены данные по износостойкости покрытий на основе меди, нанесенных методами электронского легирования (ЭИЛ) [1] и газодинамического напыления (ГДН) [2] рабочие поверхности высоконагруженных пар трения.

ЭИЛ конструкционной стали 30ХГСН2А осуществлялось с помощью установки ЕЛФА-512М. В качестве материала покрытия применяли бронзы марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6. ГДН на поверхность стали ШХ15 проводили на установке ДИМЕТ-404. В качестве материала использовали механическую смесь порошков меди и корунда. Покрытие наносилось при температуре смеси 270°C и 450°C [2].

Триботехнические испытания проводили на машинах трения: 1 - КЕ-4 по схеме перекрещивающихся цилиндров в режиме трения без смазки. Детали представляли из себя эталонный вращающийся в горизонтальной плоскости вал диаметром 100 мм и длиной 300 мм, к образующей которого с определенным усилием прижимается испытуемый образец в виде вала диаметром 11,6 мм и длиной 26 мм. Образец прижимается одним из торцов, на который нанесено исследуемое покрытие. Частота вращения эталонного вала выбиралась такой, чтобы обеспечить линейную скорость перемещения поверхности относительно испытуемого образца с покрытием 0,06 м/с. Максимальное давление при испытаниях составляло 250 МПа; 2 - на стенде МТ-8 с возвратно-поступательным движением плоских сопрягаемых образцов при давлении 10 МПа и скорости скольжения  $v=0,19$  м/с. Испытания проводились в среде минерального масла И-20А и пластичном смазочном материале ЛИТОЛ-24.

На рис. 1 показан износ исходных образцов и образцов с бронзовым покрытием в зависимости от пути трения. Как видно из графика (кривая 1), при трении образцов без покрытия при давлении 250 МПа

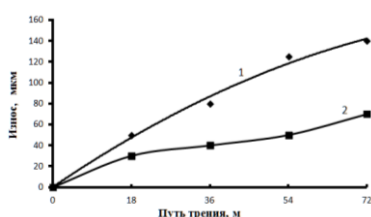


Рис.1. Зависимость величины износа от пути трения. 1 – сталь 30ХГСН2А; 2 – сталь 30ХГСН2А с покрытием из бронзы

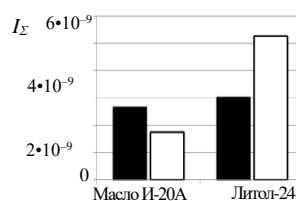


Рис. 2. Суммарная интенсивность изнашивания покрытия меди, нанесенных при температуре ■ – 270°C; □ – 450°C

происходит интенсивный износ поверхностей, режима установившегося трения не достигается. Износ образцов с покрытием из бронзы в условиях высокой нагрузки (кривая 2) значительно ниже, при этом пара выходит на установившийся режим трения, и при дальнейшем переходе в режим повреждаемости наблюдается незначительное увеличение интенсивности износа. Это свидетельствует об увеличении несущей способности пары трения с покрытием. Её возрастание обусловлено наличием подповерхностного модифицированного слоя, образовавшегося в процессе нанесения покрытий [1], при этом роль покрытия значительна на стадии приработки поверхностей.

На рис. 2 приведены сравнительные величины суммарного износа ( $I_{\Sigma}$ ) покрытий в среде минерального масла И-20А и пластичной смазки ЛИТОЛ-24. Покрытие, нанесенное при температуре 270°C, показывает лучшие результаты в смазке ЛИТОЛ-24, а нанесенное при температуре 450°C в среде минерального масла. При этом интенсивность изнашивания нанесенного покрытия составляет  $I_{H(покp)} \approx 1,5 \cdot 10^{-10}$ , а контрола  $I_{H(ст)} \approx 0,4 \cdot 10^{-11}$  является одной из низких. Подтверждением высокой работоспособности медного покрытия также может быть характеристика микрогеометрии поверхности до и после испытаний (наблюдается улучшение класса шероховатости), что свидетельствует о режиме нормального трения и отсутствии задиров. Показано [3], что низкая интенсивность изнашивания достигается формированием фрикционной пленки массопереноса в процессе трения медного покрытия о сталь.

Исходя из представленных данных можно говорить о высокой несущей способности полученных покрытий и в условиях больших нагрузок и возможности использования покрытий на основе меди в высоконагруженных узлах трения.

[1]. Куксенова Л.И., Козлов Д.А. Исследование эксплуатационных свойств покрытий для тяжело нагруженных деталей узлов трения скольжения // ВНТР. 2019. №5(141). с. 1-22.

[2]. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Пугачев М.С., Поляков А.Н., Широкова Н.В., Хренникова И.А., Куксенова Л.И. Применение покрытий, полученных газодинамическим напылением, для узлов трения // Труды конф. «Живучесть и конструктивное материаловедение» - 2018. – С.38-40.

[3]. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С., Козлов Д.А., Москвитин Г.В. Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь-сталь. // Трение и износ. 2023.с. 322-334.

# Влияние режимов ионного легирования медью на работоспособность трибосопряжения из конструкционной стали в условиях трения скольжения

Козлов Д.А.

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

koslov74@mail.ru

Как известно, ресурс работы современной техники определяется свойствами не только материала, из которого они изготовлены, но и свойствами поверхностных слоёв, участвующих в процессе трения. Поэтому качеству поверхности уделяется особое внимание. Всё более используемым методом модификации поверхностей трибосопряжений является ионное легирование. Этот метод обладает перед традиционными неоспоримым преимуществом – возможностью модификации поверхности без сильного нагрева обрабатываемых изделий (для сохранения механических свойств материала) [1].

Целью работы является исследование влияния режимов ионной имплантации на триботехнические характеристики пары трения конструкционная сталь 30ХГСН2А – конструкционная сталь 30ХГСН2А.

Образцы перед ионным легированием (ИЛ) подвергали термообработке, состоящей из нагрева до 900°C, охлаждения в масле и отпуска при 210°C. Твердость образцов достигала 42...45 HRC. ИЛ осуществлялось на источнике ионов металлов, работающего в импульсном режиме и генерирующего полиэнергетический пучок. Режимы ИЛ следующие: ускоряющее напряжение 30кВ, ток пучка ионов 0,1А. Доза легирования изменялась в пределах  $10^{17} \div 5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Температура образцов при обработке не превышала 100°C. Оценочные триботехнические испытания проводились в лабораторных условиях на машине трения KE-4 [2]. Максимальная нагрузка во время трибонспытаний составляла 250 МПа.

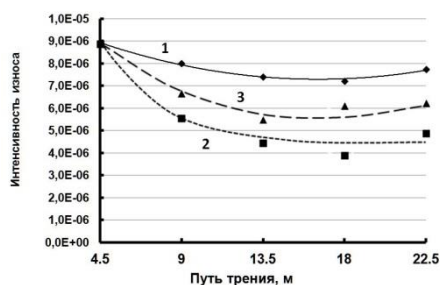


Рис. 1. Интенсивность изнашивания стали 30ХГСН2А при различных дозах имплантации: 1-исх. образец; 2-доза легирования  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; 3-доза легирования  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>

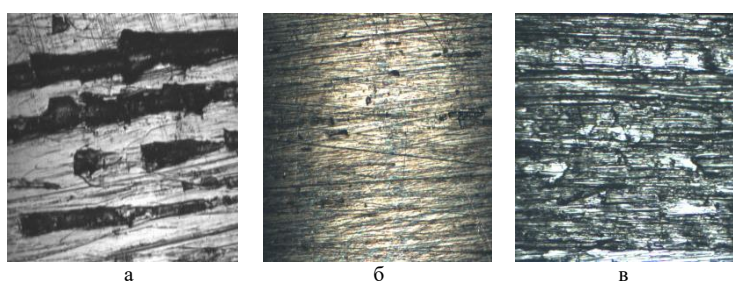


Рис. 2 Вид поверхности трения после испытания: а-без обработки; б-доза легирования  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; в-доза легирования  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

На рис.1 показан график интенсивности износа образцов в процессе испытания. Наибольшая интенсивность изнашивания у исходных образцов (кривая 1), при этом отсутствует период установившегося износа, при этом пара трения переходит в режим повреждаемости. У образцов с максимальной дозой легирования  $5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> интенсивность изнашивания значительно ниже (~1,4 раза), при этом наблюдается область установившегося износа 4,5м, после чего происходит увеличение интенсивности изнашивания, но при этом не наблюдается катастрофического износа. Наилучшая износостойкость у образцов с дозой легирования  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (кривая 2). В процессе трения интенсивность изнашивания уменьшается и после пути трения, равному 13,5 м., стабилизируется.

Поверхность образцов после испытаний представлена на рис.2. Видно, что наилучшее качество поверхности у образцов с дозой имплантации  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (рис.2б). При этом у образцов без обработки наблюдается адгезионный характер взаимодействия(2а). Поверхность трения у образца с максимальной дозой легирования имеет островковый характер (2в). Сформированные островки покрытия, обладая свойством антифрикционности, частично экранируют поверхность от разрушения, что приводит к уменьшению количества следов пропахивания и задиров и, как следствие, уровень интенсивности износа уменьшается. На поверхности трения образцов, облученной с дозой  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, присутствует равномерно распределенный слой меди по всей поверхности контакта. В работе [3] было показано, что глубина проникновения ионов меди в поверхность стали даже при максимальной дозе облучения меньше микрометра. Но при этом не смотря на малую толщину слоя, он обеспечивает повышение работоспособности стали в условиях высокой нагрузки. Данный факт свидетельствует о формировании модифицированного антифрикционного поверхностного слоя меди, а также формировании подповерхностной зоны дислокационной структуры, которая в результате локального разогрева способствует поддержанию положительного градиента свойств в процессе трения и изнашивания [4], что способствует увеличению длительности работы пары трения сталь-сталь и повышению ее ресурса.

[1]. Зацепин Д.А. Ионная модификация функциональных материалов: учебное пособие / Д.А. Зацепин, И.А. Вайнштейн, С.О. Чолах. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 104с.

[2]. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: «Техника». 1970., 396с.

[3]. Куксенова Л.И., Козлов Д.А., Алексеева М.С. Влияниеструктуры медных покрытий на работоспособность тяжело нагруженных стальных пар трения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. №4(354). С. 150-160.

[4]. Ягодкин Ю.Д. Ионно-лучевая обработка металлов и сплавов / Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. М.: ВИНТИ. Т.24. 1990. С. 167-221.



## Деформационно структурный анализ при интенсификации адгезионных процессов системы «подложка-покрытие»

<sup>1</sup>Кокорин В.Н., <sup>1</sup>Морозов О.И., <sup>1</sup>Мишов Н.В., <sup>2</sup>Родионов Д.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск, Россия;  
vnikokorin@mail.ru

<sup>2</sup>АО «Ульяновский конструкторское бюро приборостроения», Ульяновск, Россия

Термодинамической характеристикой адгезии при контакте двух разнородных фаз (твердая и жидкая) является величина поверхностного натяжения, представляющее величину свободной поверхностной энергии на единицу площади контакта фаз.

Поверхностная энергия плоскости раздела фаз пропорциональна удельной энергии межфазного взаимодействия, или поверхностному натяжению, и удельной площади поверхности раздела фаз:

$$G_s = \sigma_n S \quad (1)$$

Равновесные гетерогенные систем, а именно, система «жидкая-твердая» фазы, определяются уровнем энергии Гиббса ( $G_s$ ), характеризующей состояние поверхности раздела фаз.

Исходя из второго начала термодинамики, условием самопроизвольного протекания поверхностных процессов является уменьшением энергии систем, - уменьшение энергии « $G_s$ », которая может наблюдаться при следующих условиях:  $\sigma_n \rightarrow \downarrow$ ;  $S \rightarrow \uparrow$ ;  $\Delta G_s = \Delta \sigma_n \cdot \Delta S \rightarrow \downarrow$ .

При этом, очевидно, выполняется локальное снижение напряжения натяжения жидкой фазы на поверхности подложки в очагах активации за счет увеличения длины/площади межзеренных границ при дроблении зерен металла и увеличения межзеренных границ, что обеспечивает повышение адгезионных процессов. Основным источником энергии активации является работа пластической деформации поверхностных микронеровностей, т.к. она макрогенерирует дефекты кристаллической решетки [1].

Реализация структурной модификации металла подложки за счет деформационной составляющей позволяет изменить: а) как величину интегральной площади контакта фаз:

$$S_i = S_0 + S_{\Delta}, \quad (2)$$

где  $S_{\Delta}$  - избыточная площадь модифицированной поверхности, образованная за счет микронеровностей (в том числе, и включая ступени полос скольжения), - соответственно, уменьшить величину поверхностного натяжения: ( $\sigma_n = \frac{G_s}{S}$ ); б) так и создать условие *роста количества контактных центров схватывания и площадок активации* системы «подложка-покрытие».

При этом, следует принимать во внимание, что границы зерен из-за большого скопления примесей имеют меньший энергетический потенциал по сравнению с металлом зерен. Таким образом, выполняется следующий алгебраический ряд:  $\uparrow N_{\text{зерен}} \rightarrow \downarrow W_i$ , что определяет условие образования устойчивых адгезионных связей системы «адгезив-субстрат» («подложка-покрытие»).

Следует заметить, что таким образом, выполняется следующая зависимость:

$$\left\{ \begin{array}{l} \downarrow \frac{d d_{\text{зерн}}}{d \varepsilon} \Rightarrow \downarrow \frac{d W_i}{d \varepsilon} \Rightarrow \uparrow K_{\text{адгезии}} \\ \downarrow W_i \rightarrow \uparrow K_{\text{адгезии}} \end{array} \right. \quad (3)$$

Таким образом, энергетический барьер, соответствующий изменению кристаллической структуры металлов, необходимый для образования требуемого количества центров активации (схватывания), определяется из выражения:

$$\sigma_p \geq \frac{\Delta \gamma_s}{a_{\text{гп}}} \cong 0,5 \frac{\Delta \gamma_s}{a_{\text{гп}}}, \quad (4)$$

где  $a_{\text{гп}}$  – длина контактной межзеренной поверхности.

*Критерий* образования новой контактной поверхности при деформационном упрочнении и фрагментации зеренной структуры подложки за счет чего наблюдается увеличение как центров, так и площадок активации, определяется как *условие перехода энергетического барьера*, при котором обеспечиваются эффективные адгезионные связи, определяется:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,5 \frac{\Delta W_{\Sigma}}{S_i^{3/2}} \geq [E_s] \\ \chi = \frac{S_i}{S_0} = \frac{S^{3/2}}{S_0} = 1,5 \end{array} \right. \quad (5)$$

Модификация структуры металла подложки в результате механической активации металла при деформационном упрочнении определяет образование адгезии должного уровня, что коррелирует с результатом экспериментальной проверки при скрабировании адгезионных покрытий и анализе микроструктуры системы «подложка-покрытие» [2].

- [1]. Колбасников Н.Г. Физические основы прочности и пластичности металлов / Учебное пособие / Санкт-Петербург, 2004г. С. 360.  
[2]. Кокорин В.Н., Морозов О.И., Мишов Н.В. Анализ структурно-деформационных характеристик при локализованном пластическом сдвиге гетерофазных материалов на основе железа/ Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19. № 4. С. 164-169.

## Метод контроля трибологических свойств азотированных конструкционных сталей

Куксенова Л.И., Алексеева М.С.

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

lkukc@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований структурных изменений в зоне контактной деформации при трении сталей разных структурных классов после разных режимов азотирования, оценки их относительной износостойкости с целью разработки трибологического критерия качества поверхностных слоев с точки зрения их работоспособности в азотированных узлах трения.

Исследовали стали и сплавы с разным типом решетки матрицы: на основе  $\alpha$ -Fe (ОЦК) – стали перлитного и мартенситного классов (40X, 38X2МЮА, ВКС-7, модельные сплавы Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-Al, содержащие ~4% (ат.) легирующего элемента); на основе  $\gamma$ -Fe (ГЦК) – модельные сплавы, легированные Ni (29 ат. %), Cr, Al, Ti в количестве до 4% (ат.), а также аустенитная сталь 12X18H10T.

Структурные характеристики материала зоны контактной деформации представлены физическим уширением рентгеновских линий стали и сплавов, фазовым составом азотированного слоя, размером упрочняющих частиц и плотностью их распределения. Для оценки этих характеристик применяли металлографический, рентгеноструктурный и электронномикроскопический методы.

Триботехнические испытания проводили по нескольким схемам: на стенде с возвратно-поступательным движением плоских сопрягаемых образцов при давлении  $p = 10-40$  МПа и скорости скольжения  $V=0,19$  м/с в пластичных смазочных материалах; на стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием при  $N = 500$  Н ( $p = 348$  МПа) и  $V = 0,96$  м/с в масле И-20А; для схемы скольжения ролика по плоскости использовали машину трения Шкода-Савин при числе оборотов ролика  $675 \text{ мин}^{-1}$  и давлении 150Н. Определяли макроскопическую характеристику пары трения в целом – износостойкость сталей, связанную с уровнем поверхностного разрушения в условиях контактной деформации. Микроскопические критерии выявляют структурное состояние зоны деформации при трении, макроскопические – отражают механизм контактного взаимодействия, связанный с деформацией и разрушением поверхности. Сочетание характеристик материалов узла трения на макро- и микроскопическом уровнях характеризуют качество материала поверхностного слоя с позиций трибологии.

Анализ закономерностей изменения структуры диффузионной зоны азотированных сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов и относительной износостойкости в зависимости от их состава и технологических параметров процесса обработки показал, что максимальной износостойкостью обладает азотированный слой, содержащий упрочняющие дисперсные частицы некогерентных нитридов, что обеспечивает меньшую склонность к охрупчиванию азотированного слоя вследствие снижения уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы [1].

Показано, что предварительные виды обработки (термическая и деформационная) азотируемых сталей являются средством формирования структурно-фазового состояния поверхностного слоя, обладающего повышенными триботехническими характеристиками. Для азотированных сплавов на основе железа с ОЦК и ГЦК решетками матрицы экспериментально установлены наиболее значимые характеристики структурного состояния и свойств поверхностных слоев, влияющих на уровень поверхностного разрушения при трении: размер частиц нитридов легирующих элементов, расстояние между ними, плотность их распределения, микродеформация кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий структурных составляющих материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя и ее изменения при трении.

Разработан комплексный подход к оценке триботехнической эффективности химико-термической обработки на примере азотирования конструкционных сталей и сплавов. Подход состоит из трех этапов исследований азотированной поверхности: 1 – на основе разработанного трибологического критерия, содержащего микро- и макроскопические характеристики материала зоны контактной деформации при трении, проводится выбор режимов его обработки для обеспечения допустимого уровня поверхностного разрушения; 2 – экспериментально с помощью поверхностной пластической деформации оценивается способность азотированного слоя (сформировавшегося в результате обработки по выбранному режиму) воспринимать поверхностную пластическую деформацию без разрушения, что служит обоснованием режимов химико-термической обработки; 3 – оценка предельной работоспособности азотированного материала в условиях трения и изнашивания (предельно допустимого давления, при котором пара работает устойчиво, критического давления, после которого пара неработоспособна, но возможна оценка ее работоспособности при кратковременных перегрузках, средней суммарной интенсивности изнашивания пары в целом, потерь на трение). Совокупность выявленных параметров позволяет рекомендовать материал, его обработку и режимы эксплуатации.

[1]. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Оспенникова О.Г., Алексеева М.С., Громов В.И. Инженерия поверхности и эксплуатационные свойства азотированных конструкционных сталей / Под общ. ред. Е.Н.Каблова. - М.: ВИАМ, 2019. 600 с.

## Влияние поверхностно-активной среды на структуру и свойства конструкционных материалов в условиях контактной деформации

<sup>1</sup>Куксенова Л.И., <sup>2</sup>Савенко В.И.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

[kukc@mail.ru](mailto:kukc@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт Физической химии и электрохимии РАН, Москва, Россия

Узлы трения современных машин работают в условиях, когда поверхности трения не разделены сплошным слоем смазочного материала, а непосредственный контакт элементов сопряжения предотвращается или минимизируется образованием в зоне трения особых поверхностных слоев (вторичных структур), являющихся результатом взаимодействия деформируемых при относительном перемещении твердых тел с компонентами смазочной среды. Имеет место режим трения, при котором деформация, изменения структуры и свойств, поверхностное разрушение определяются свойствами материалов твердых тел и смазочных материалов.

Известно, что среди феноменологических критериев допустимого уровня разрушения поверхности наиболее общим признается правило положительного градиента механических свойств материала контактирующих тел по глубине поверхностных слоев [1,2]. Природа смазочного действия оказывает определяющее влияние на реализацию этого правила, а в основе этого влияния лежит формирование износостойкой макро- и микроструктуры деформированной зоны трибоматериала, определяемой структурными изменениями и диффузионным перераспределением легирующих элементов. Наибольший положительный триботехнический эффект имеет место при наличии в смазочных материалах поверхностно-активных веществ (ПАВ), компоненты которых в процессе контактной деформации вызывают адсорбционное пластифицирование тончайшего поверхностного слоя (эффект Ребиндера) [3].

Представлены результаты исследования структурных изменений в условиях трибоконтактной деформации чистых металлов, латуней и бронз при трении в паре со сталью в активных смазочных средах и их влияния на реализацию положительного градиента механических свойств по нормали к поверхности контактного взаимодействия – необходимого условия реализации режима «безызностного» трения. Работа состоит из трех частей: 1 - оценка распределения остаточных напряжений в условиях контактной деформации при трении методом численного моделирования; 2 - рентгеновское исследование структурных изменений в поверхностных слоях металлических материалов в условиях трибоконтактной деформации в разных смазочных средах и определение уровня поверхностного разрушения; 3 – примеры реальных испытаний, иллюстрирующие влияние активных смазочных материалов (принцип действия которых основан на реализации правила положительного градиента механических свойств) на работоспособность тяжело нагруженных пар трения.

Объектом исследования служила пара трения медный сплав – сталь. В качестве антифрикционного сплава использовали медь, сплавы на основе Cu-Zn, Cu-Al и Cu-Sn. Смазочными средами являлись медицинское вазелиновое масло, глицерин, минеральные масла, гидравлические жидкости на основе глицерина и пластичные смазочные материалы, в состав которых входили ПАВ. Триботехнические испытания проводили на машине реверсивного трения МТ-8 в диапазоне давлений 5-140 МПа и средней скорости скольжения 0,19 м/сек.

На основе расчета эпюр компонент тензора остаточных напряжений в поверхностном слое при скольжении с трением сформулированы представления о роли среды в создании пластифицирующего и упрочняющего трибоэффекта. Представлены характеристики структурного состояния поверхностных слоев латуней, алюминиевых и оловянных бронз при трении по стали в поверхностно-активных смазочных средах. Установлено, что минимальные потери на трение и износ достигаются при создании однофазной структуры  $\alpha$ -твердого раствора в приповерхностных слоях медных сплавов и при наличии соответствующего концентрационного интервала растворимости легирующего элемента в твердом состоянии. Показано, что такие граничные условия обеспечиваются наличием в зоне контактной деформации поликомпонентного трибоматериала стационарных макроскопических диффузионных потоков легирующих элементов. Выявлена роль локальных диффузионных явлений в квазиспинодальных фазовых переходах, наблюдающихся в приповерхностных микрообъемах медных сплавов в процессе их контактной деформации. Показано, что среди промышленных медных сплавов наибольшей износостойкостью в поверхностно-активных смазочных средах обладают латуни типа Л90, алюминиевые бронзы БрА5, БрА7, оловянные бронзы – БрОФ4-0,25, БрОФ6,5-0,15. Приведены примеры реализации в парах трения явления избирательного переноса. Даны рекомендации по его применению в узлах трения машин и приборов.

[1]. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

[2]. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.

[3] Щукин Е.Д., Савенко В.И., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. М.: NOBEL PRESS, 2015. 679 с.

## Тензорные методы сжатия данных

*Курьянова М.С. Ерофеев М.Н.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
kuriyanovams@yandex.ru

Ряд исследований подразумевает сбор данных о физико-химических свойствах материалов, объединённых по тому или иному групповому признаку. Примерами подобных данных могут служить анализ свойств структуры наноматериалов. Данные исследуемых объектов имеют некоторую общность и индивидуальные различия. Одной из задач машинного обучения является факторизация матриц и разложения многомерных данных на параметры. Особенность задачи факторизации состоит в том, что приближение исходных данных строится с использованием операций произведения параметров разложения. Методы, основанные на построении матричных разложений предложенные в работах [1,2] используют для выявления информации о групповой структуре.

Выборка наблюдений(образцов), и каждый её элемент характеризуется некоторыми величинами, эти величины соответствуют некоторым измеримым свойствам рассматриваемых образцов и имеют многомерную структуру. В ряде практических задач признаковое пространство либо имеет естественную многомерную структуру, либо допускает введение искусственной. Если же данные из многомерного признакового пространства представимы в формате тензорного разложения с малым числом параметров, то, во-первых, они допускают более эффективные вычисления с ними и более компактное хранение, решая или ослабляя упомянутую ранее проблему проклятия размерности; во-вторых, отдельные параметры разложения могут оказаться информативными признаками.

В данной работе рассматривается модели тензорного разложения с разными форматами отдельных компонент (слагаемых) разложения. Выделяется важность проблемы разделения признаков и построения признакового пространства. Одним из приложений тензорных разложений является задача сжатия данных.

Эффективным представителем класса общих методов сжатия данных является концепция разделения переменных в тензорных произведениях. Общая идея состоит в том, чтобы представить (или приблизить) большой многомерный массив с помощью комбинации произведений и сложений небольших массивов с меньшим количеством степеней свободы. Различные тензорные разложения используются в разных прикладных задачах вычислительной физики, обработки сигналов, машинного обучения и анализа данных.

- [1]. V.D.Calhoun, J.Liu, T.Adali. A review of group ICA for fMRI data and ICA for joint inference of imaging, genetic, and ERP data. // Neuroimage, 2009. V.45 N.1. p.163–172.
- [2]. G.Zhou, A.Cichocki, Yu.Zhang, D.Mandic. Group component analysis for multiblock data: Common and individual feature extraction // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2015. pp.1–14.
- [3]. Oseledets I. V., Savostyanov D. V. Methods of tensor decomposition // Matrix methods and technologies for solving large problems / ed. by E. E. Tyrtshnikov. IVM RAS, 2005. pp. 51-64.

## Повышение эффективности виброзащиты высокочувствительного оборудования релейной железнодорожной автоматики

Курзина Е.Г., Кудряцева В.Д., Амирханов М.Р., Арутюнян А.С.  
Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия;  
kurzina\_elena@mail.ru

### Цель

Движение железнодорожного подвижного состава по рельсовому пути создает постоянные вибрации грунта в виде сейсмических волн, воздействующих на конструкции расположенных вблизи зданий и сооружений. Особенно чувствительным к таким динамическим воздействиям является оборудование релейной железнодорожной автоматики, вибрация которой может привести к помехам, сбоям и отказам, что непосредственно влияет на безопасность движения.

Для снижения уровня вибраций между оборудованием и полом рекомендовано устанавливать изоляторы [1] из эластичных пластмасс или резиновых материалов. Однако, до настоящего времени не проведены исследования эффективности таких систем при действии статической и динамической нагрузок различной частоты и амплитуды, а также влияния старения вибродемпфирующих материалов в процессе эксплуатации, деструкции при воздействии агрессивных сред, накопления остаточные деформации.

### Результаты исследований

Наиболее информативным показателем демпфирующих свойств изоляторов для защиты высокочувствительной релейной автоматики является динамическая жесткость, т.к. проход подвижного состава по железнодорожному пути связан с периодическим ударом колеса по рельсу. В связи с чем в настоящей работе проведены исследования динамической жесткости резиновых композитов толщиной 7 и 14 мм в зависимости от амплитуды (рис.1) и частоты воздействующей нагрузки.

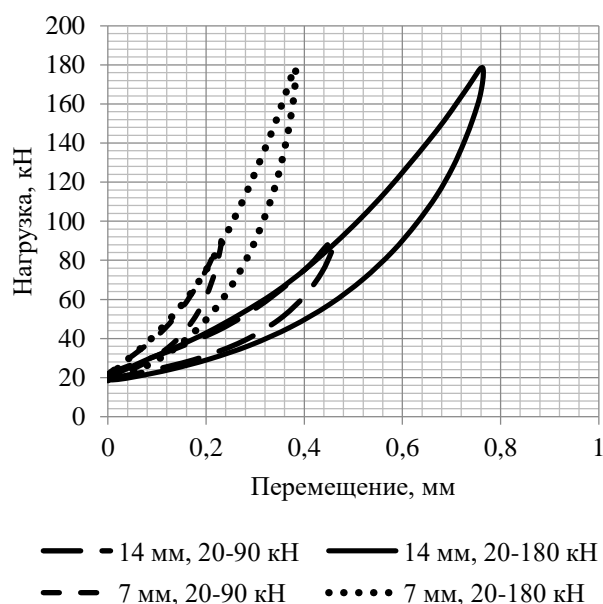


Рис.1. Динамический гистерезис резинового эластомера, толщиной 7 мм и 14 мм при температуре +23°С

В результате исследований установлено, что с увеличением толщины демпфирующие свойства резинового эластомера повышаются пропорционально его толщине. С увеличением амплитуды колебаний динамическая жесткость композита повышается в 1,35 раза вне зависимости от толщины, а механические потери за цикл деформации – в 2,5 раза. Повышение частоты воздействующей нагрузки с 3 до 10 Гц незначительно (~на 5%) увеличивает динамическую жесткость резинового эластомера.

### Выводы

Увеличение толщины изоляторов для защиты высокочувствительной релейной автоматики пропорционально повышает их демпфирующие свойства. Рост амплитуды колебаний значительно увеличивает механические потери за цикл деформации, что приведет к более интенсивному старению материала. Поэтому в состав композита необходимо введение противостарительных добавок. Повышение частоты воздействующей нагрузки с 3 до 10 Гц незначительно сказывается на демпфирующих свойствах рассмотренного резинового эластомера.

Таким образом, комплексные исследования изменения основных механических характеристик вибродемпфирующих материалов позволит проектировать эффективные системы виброизоляции в широком диапазоне нагрузок, повысить их качество и срок службы, а также продлить срок эксплуатации самого объекта.

[1]. ГОСТ Р 59940-2021. Системы виброизоляции зданий и сооружений. Методы испытаний вибродемпфирующих материалов: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2022-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 19 с.

## Применение импульсного тока в процессах деформационной обработки материалов

*Мисоченко А.А., Столяров В.В.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
ls3216@yandex.ru

Целью доклада является обзор работ, рассматривающих применение импульсного тока в процессах деформационной обработки различных материалов.

В обзоре рассматриваются внешние и внутренние факторы, влияющие на деформационное поведение различных материалов при деформировании с током. Рассмотрено влияние электропластической деформации на микроструктуру и свойства. Приведена информация о моделировании и наиболее принятых механизмах электропластического эффекта. Приводятся примеры применения эффекта преимущественно к процессам обработки металлов давлением.

Физические явления, возникающие при воздействии импульсного тока на твердые металлические материалы, хорошо известны. К ним относят тепловой нагрев (эффект Джоуля-Ленца), появление магнитного поля (и, как следствие, скин- и пинч-эффекты), вибрацию [1]. Наиболее заметным среди перечисленных эффектов является тепловой эффект, который часто используется в технологиях электроимпульсной обработки (ЭИО) для изменения различных свойств за счет сопутствующих эффекту структурных изменений. В случае комбинированного воздействия на материал одновременно импульсного тока и пластической деформации такие процессы называют электропластической деформацией (ЭПД). Такие процессы и будут рассмотрены в докладе. В основе ЭПД действуют все вышеперечисленные механизмы во взаимодействии с пластической деформацией (то есть с движением дислокаций), которая может усиливаться, приводя к повышению деформируемости и осуществляться при меньших напряжениях вследствие возникновения электропластического эффекта (ЭПЭ) [2]. ЭПЭ – явление, сложно зависимое от многих внешних и внутренних факторов [3]. К внешним факторам относятся те, которые связаны с деформацией – схема напряженно-деформированного состояния; скорость и температура деформации; режимы импульсного тока. Такие факторы, как материал, его структура, фазовый состав, являются внутренними факторами.

Особенностью импульсного тока является многообразие регулируемых параметров. К ним относятся направление, плотность, частота, длительность, скважность, форма импульса. Один из сопутствующих току эффектов, электропластический (ЭПЭ), может рассматриваться как замена термической обработки, а также использоваться в деформационных методах обработки конструкционных материалов [4].

Данный обзор был подготовлен, чтобы понять каков был прогресс в области наших знаний, понимания и применения явления электропластичности в разных материалах. За прошедшие несколько лет интерес ученых к проявлению электропластичности значительно повысился. Количество опубликованных статей в мире по данной тематике растет ежегодно. Среди исследуемых внешних и внутренних факторов, сильно влияющих на эффекты тока в проводящих материалах, появились новые, например, скважность импульсного тока и размер зерен в широком диапазоне, которые расширяют наши представления о природе ЭПЭ. Особый интерес вызывают исследования ЭПЭ в материалах с памятью формы и применение режимов тока, стимулирующих релаксационные явления без существенного нагрева.

Структурные особенности при деформации с током, как правило, носят локальный характер и относятся, например, к небольшим различиям в разориентировках зерен или к морфологии формирования двойников. Этот факт вызывает дополнительный интерес исследователей, но и усложняет задачу понять и объяснить природу ЭПЭ, которая, несмотря на многообразие работ по этой тематике, все еще остается открытой. Авторы, которые не ставят перед собой задачу нагрева током, не наблюдают значительных структурных изменений, в частности, роста зерна, при одновременном воздействии тока и деформации, что подтверждает наличие атермической составляющей ЭПЭ [5]. Одним из важнейших технологических свойств, на которое оказывает влияние деформирование с током, является деформируемость. Благодаря повышению деформируемости становится возможным обработка давлением без повышения температур труднодеформируемых в обычных условиях и хрупких материалов. Кроме того, ЭПЭ может являться одним из способов управления функциональными свойствами (электрические, коррозионные, свойства памяти формы и др).

В связи с многообразием явлений, сопровождающих деформацию с током, становится актуальнее проблема создания единой теории электропластичности. В этой связи моделирование, особенно на микроуровне, является крайне важной тенденцией для фундаментальных и прикладных исследований ЭПЭ. Говоря о применении электропластичности, можно отметить относительно небольшое число таких примеров в реальной индустрии, по сравнению с исследованиями. В большинстве случаев это связано с недостаточно высокими техническими характеристиками импульсных генераторов и низкой скоростью деформации.

[1]. Sheng Y., Hua Y., Wang X., Zhao X., Chen L., Zhou H., Wang J., Berndt C., Li W. Application of High-Density Electropulsing to Improve the Performance of Metallic Materials: Mechanisms, Microstructure and Properties. *Materials*, 2018. N11, p.185.

[2]. Troitskiy O.A. Electromechanical effect in metals, *JETP Lett.*, 1969. N1, p.18–22.

[3]. Stolyarov V., Calliari I., Gennari C. Features of the interaction of plastic deformation and pulse current in various materials. *Materials Letters*, 2021, N299, 130049. .

[4]. Skvortsov O.B, Stashenko V.I., Troitskiy O.A..Electroplastic effect and interaction of an electrical impulse with a conductor. *Letters on Materials*, 2021. V11. N4, p. 473-478.

[5]. Корольков О.Е., Пахомов М.А., Столяров В.В. Электропластический эффект в титановых сплавах при их растяжении. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2022. Т. 88, № 10. С.73-82.

## Методика построения определяющего наследственного соотношения однонаправленного композита при внутрислойном сдвиге

*Моисеенко В.В., Думанский А.М.*

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

mvvmoiseenko@yandex.ru

На основе анализа экспериментальных данных было выявлено, что реологические и физические нелинейные свойства однонаправленного слоя главным образом определяются на основе данных о сдвиге внутри слоя. Основной целью этого исследования является разработка методики формирования наследственной связи при сдвиге внутри слоя.

Анализ закономерностей механического поведения образцов из композиционных материалов при нагружении с разными скоростями нагружения рассмотрены в [1]. Как правило, исследованиях отмечается рост модуля упругости с увеличением скорости нагружения. Применение наследственных соотношений с резольвентными ядрами, представленных в [3] является наиболее распространенным подходом для описания зависимости  $E(\epsilon)$ . С достаточной точностью влияния временных эффектов может быть описан нелинейным уравнением Работнова при внутрислойном сдвиге со слабосингулярным ядром Абеля:

$$\varphi(\gamma) = (1 + kI_\alpha^*)\tau, \quad (1)$$

где  $\varphi(\gamma)$  - кривая мгновенного деформирования  $I_\alpha^* \cdot f = \frac{1}{\Gamma(1+\alpha)} \int_0^t f(\eta)(t-\eta)^\alpha d\eta$ ,  $-1 < \alpha < 0$  - параметр

сингулярности ядра,  $\Gamma(\cdot)$  - гамма-функция соответствующего аргумента. Физическая нелинейность описывается кривой мгновенного деформирования, которая на нелинейном участке должна быть аппроксимирована некоторой функцией отражающей закономерности механического поведения. В частности, в работе [4] рассмотрены аппроксимации в виде кусочно-линейной и степенной функций.

Учитывая, что резольвентой ядра Абеля является дробно-экспоненциальная функция Работнова, обратим определяющее соотношение (1)

$$\tau = (1 - k\mathcal{E}_\alpha^*(-k))\varphi(\gamma), \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_\alpha^*(-k, t) = t^\alpha \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n t^{n(1+\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]}$  есть ядро дробно-экспоненциальной функции  $\mathcal{E}_\alpha^*(-k)$ . Отметим, что при

малых значениях времени справедливо [3]:  $\mathcal{E}_\alpha^*(k, t) \approx \frac{t^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} = I_\alpha(t)$ , где  $I_\alpha(t)$  - ядро оператора Абеля.

Определяющее соотношение (2) принимает конкретную форму в зависимости от аппроксимации функции мгновенного деформирования. Принимаем кусочно-линейную аппроксимацию мгновенного модуля внутрислойного сдвига [4]:  $\tau(\gamma) = G_0\gamma - (G_0 - \Delta G_0)(\gamma - \gamma_*)H(\gamma - \gamma_*)$ , где  $G_0$  - упругий модуль по мгновенной кривой деформирования,  $\Delta G_0$  - величина, на которую уменьшается мгновенный модуль сдвига после достижения некоторого порогового значения деформации сдвига  $\gamma_*$ ,  $H(\cdot)$  - функция Хевисайда.

Определяющее соотношение (2) при кусочно-линейной аппроксимации кривой мгновенного деформирования примет следующий вид [5]

$$\tau(\gamma) = G_0\psi(t) - (G_0 - \Delta G_0)\psi(t - t_*)H(t - t_*), \quad (3)$$

где  $\psi(t) = (1 - k\mathcal{E}_\alpha^*(-k))\gamma$ . Конкретный вид определяющего соотношения будет зависеть от задания истории изменения деформации во времени, в частности, при ползучести  $\gamma = \gamma_0$ , при деформировании с постоянной скоростью  $\dot{\gamma}$  нужно определить  $\psi(t)$  подставив  $t = \gamma/\dot{\gamma}$ . Для построения определяющего соотношения в нашем случае необходимо иметь числовые значения следующих параметров:  $\alpha, k, G_0, \gamma_*$ .

При больших значениях скорости нагружения время деформирования образца может быть незначительным, в этом случае вместо дробно-экспоненциальной функции Работнова возможно использование оператора Абеля.

[1]. George C. Jacob, 1 J. Michael Starbuck, 2 John F. Fellers, 1 Srdan Simunovic, 3 Raymond G. Boeman Strain Rate Effects on the Mechanical Properties of Polymer Composite Materials Journal of Applied Polymer Science, Vol. 94, 296–301 (2004)

[2] Yoon K.J., Sun C.T. Characterization of elastic-viscoplastic properties of of an as4/PEEK thermoplastic composite. Journ. Compos. Mat-s. Vol. 25 –October 1991. Pp 1277-1296.

[3]. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 384с.

[4]. Думанский А.М., Лю Хао, Алимов М.А. Анализ нелинейного деформирования однонаправленного углепластика при квазистатическом нагружении // XI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания. Материалы конференции. Электронное издание. М.: 2019. С. 143-152.

[5]. Бугаков И.И. Ползучесть полимерных материалов. М.: Наука. 1973. 287 с.

## Некоторые закономерности накопления повреждений при различных видах циклического нагружения и в гигацикловой области

Петрова И.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
impetr@mail.ru

В элементах конструкций (автомобилей, турбин, аппаратов химической промышленности и т.п.), работающих в течение длительного времени или при высокочастотных нагрузках таких как элементы конструкций когда диапазон срока службы находится в области усталостной долговечности за пределами  $10^7$  циклов, а действующие напряжения ниже традиционного предела усталости, соответствующего долговечности  $2 \times 10^6 \div 10^7$  циклов нагружения меняется механизм разрушения и развития трещин. При этом следует учесть возможное появление в элементах конструкций пластических деформаций при пусках и остановках, влияние трения и износа в элементах трибосопряжений и еще целого ряда факторов, которые приводят к деградации эксплуатационных характеристик технических систем. При этом требуется определить причины достижения объектом наблюдения предельного состояния по различным критериям, ориентируясь на степень их влияния на накопление повреждений в рассматриваемом объекте. В работе [1] был предложен критерий, учитывающий влияние динамического нагружения и трения на накопление повреждений в поверхности деталей, который записывался в виде:

$$D = D_N + D_\epsilon + D_{II} \quad (1)$$

где  $D_N$  отражает накопление повреждений при динамическом нагружении и упругом деформировании, соответствующее многоциклового усталости;  $D_\epsilon$  - накопление повреждений при упруго пластических деформаций - малоциклового усталости,  $D_{II}$  - накопление повреждений от износа при трении. Величины  $D_N$ ,  $D_\epsilon$ ,  $D_{II}$  при эксплуатации на различных режимах определяют на основании линейного суммирования повреждений. Для их определения необходимо располагать кривыми усталости

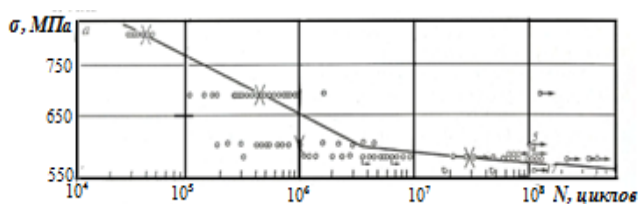


Рис.1. Кривая усталости высокопрочной Cr-Mo стали

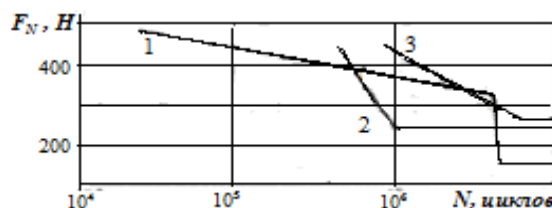


Рис.2. Кривые фрикционной (1 - без изгиба) и фрикционно-механической усталости с изгибом (2 -  $\sigma_n = 160$  МПа) и (3 -  $\sigma_n = 50$  МПа)

На рис. 1 представлена кривая усталости высокопрочной Cr-Mo стали, полученная по путем испытаний до базы  $5 \cdot 10^8$  циклов [2]. Для описания подобных кривых усталости, включающих с целью гигацикловую усталость предложено [3] использовать уравнение кривой усталости в форме Вейбулла.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{-1} + A [ \lg(N+N_1) ]^{-\alpha}, \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}$  - отношение амплитуды напряжений к пределу выносливости для базы испытаний  $10^7$  циклов,  $\bar{\sigma}_{-1}$  - отношение предела выносливости для неограниченной базы к пределу выносливости для базы испытаний  $10^7$  циклов,  $N$ ,  $A$ ,  $\alpha$  - параметры уравнения обобщенной кривой усталости.

При трении нагрузка, циклически действующая на поверхность, даже если она достаточно мала, вызывает в поверхностном слое сжимающие и растягивающие напряжения, что может привести к усталостному разрушению поверхности [4]. Усталостный характер накопления повреждений и изменения коэффициента трения, зафиксированный при испытании на моделях фрикционного контакта, подтверждают экспериментально полученные в работе [13], приведенные на рис. 2, в координатах контактная нагрузка - число циклов до наступления предельного состояния вкладыша по критерию износа. На рис. 2 видна область малоциклового усталости I, примерно до  $4,2 \times 10^6$  чисел циклов, II - область многоциклового усталости, расположенной почти вертикально, откуда можно сделать вывод, что наибольшее влияние на накопление усталостных повреждений трение оказывает на накопление повреждений при малоциклового усталости.

[1]. Петрова И.М., Москвитин Г.В., Гриб В.В.. Влияние износа на накопление усталостных повреждений// Заводская лаборатория. 2006. № 11. с. 49-52.

[2]. Захарова Т.П. К вопросу о статистической природе усталостной повреждаемости. // Проблемы прочности. 1974. № 6. с.53-59.

[3]. Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В. Усталость легких конструкционных сплавов М. Машиностроение. 1973. 317с

[4]. Крагельский И.В., Фляйшер Г., Комбалов В.С., Тум Х. Расчет трения, износа и долговечности с позиций молекулярно-механической, усталостной и энергетической теорий. // Проблемы машиностроения и автоматизации. №12. 1986. с. 13-25.

[5]. А.В.Богданович, О.М.Еловой, И.Н.Лис, Ю.А.Головченко. Экспериментальное исследование закономерностей обратного эффекта сталь 45 - силумин при фрикционно-механической усталости. Трибофатика Труды VI МСТФ 2010. часть 1. с. 527-532.



## Анализ предельных состояний и ресурса металлических конструкций и изделий из полимерных материалов

Петушков В.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
pva\_imash@bk.ru

Предлагаемый в работе метод моделирования нелинейных гиперупругих сред основан на гамильтоновом описании дискретной механики и симплектических схемах интегрировании решения на временном слое [1]. Он разработан для изучения нелинейной динамики 3-хмерных элементов конструкций, подвергаемых большим смещениям и деформациям, в том числе биологических объектов в реальном времени на основе их реальных анатомических геометрических моделей (образов), получаемых компьютерной томографией (КТ). Необходимые в этой связи деформационные и усталостные характеристики материалов, включая зарождение и рост трещин могут быть получены экспериментально [1, 2]. Для эластомеров рассматриваются возможные подходы к анализу зарождения усталостных трещин и потере жесткости. Применяемая модель изотропного повреждения использует скалярную переменную, которая изменяется вместе с максимальной достигнутой эквивалентной деформацией. Эта переменная повреждения определяет коэффициент снижения напряжения, который описывает эффект разрыхления (размягчения) материала.

В моделировании при таком подходе область, занимаемая нелинейной гиперупругой деформируемой средой (объектом), представляется в виде множества дискретных случайным образом распределенных точек, обычно называемого облаком, или точечной моделью, [1]. Решение задачи динамики строится далее по локальным группам этих точек, наделенных объемом и массой, как материальных частиц, которые не имеют между собой никакой топологической связи и, следовательно, нет необходимости в построении сетки. При этом пространственные пиксели КТ, образующие реальную картину образа исследуемого биологического объекта, непосредственно используются в качестве дискретной модели, [2]. Эффективность подхода подтверждена примерами решения задач в том числе с известными решениями, полученными МКЭ.

Анализ предельных состояний и ресурса металлических конструкций и изделий из полимерных материалов зависят от их способности воспринимать без разрушения статические и динамические нагрузки при длительном воздействии окружающей среды. При этом материалы сопротивляются деформированию и разрушению в зависимости от условий нагружения и структурного состояния. На рис.1 показано распределение повреждений в пластине из силиконовой резины, используемой в конструкциях качающихся сопел ракет, подвергнутой динамическому нагружению растяжением. Расчетная схема включает порядка 30000 точек, использовано три слоя частиц по толщине. Шаг по времени  $\Delta t = 1,0 \times 10^{-8}$  с.

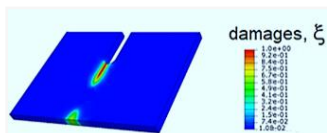


Рис.1. Распределение повреждений в пластине для момента времени  $T = 10,5$  мс

Изучение предельных состояний и процессов разрушения с учетом возникновения конечных деформаций выполнено на примере тонкостенной цилиндрической оболочки, нагруженной изменяющейся во времени нагрузки, с известными решениями, полученными МКЭ, рис.2. Использовано 4 слоя по толщине оболочки и порядка 820 точек на поверхности каждого ее слоя.

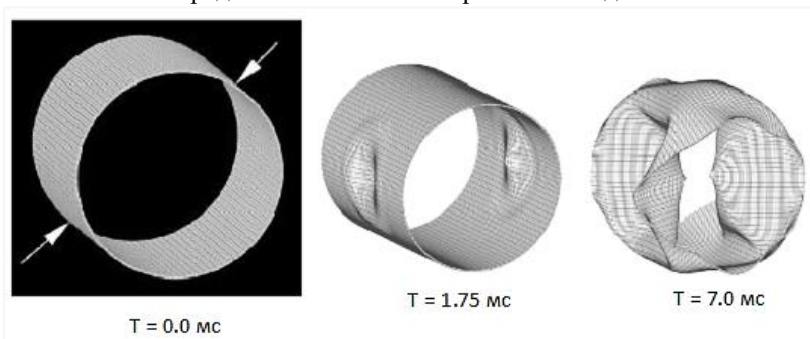


Рис.2. Предельные состояния в цилиндрической оболочке

[1]. Petushkov V.A., Discrete a non-linear Hamiltonian dynamics models of hyperactive elastic deformable media // J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., 2013, Volume 6, Issue 2, 237–246

[2]. Petushkov V.A. To Forecasting Residual Lifetime of Damaged Constructions under Shock Impacts in Operation // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2020, 49(2), с. 159–169

## Анализ динамики искусственного клапана сердца

Петушков В.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
pva\_imash@bk.ru

Для изучения нелинейной динамики трехмерных гипер- или гипервязкоупругих элементов конструкций, машин и биологических объектов, таких как головной мозг, сердце и его клапаны, кровеносные сосуды и др., подвергаемым большим (конечным) деформациям материалов (тканей) при наличии патологий и деградации свойств, разработан без сеточный дискретно-точечный градиентный метод численного моделирования, основанный на Гамильтоновом описании дискретной классической механики и симплектическом интегрировании решения на временном слое [1]. При таком подходе появляется возможность использовать реальные анатомические геометрические модели (образы) объектов биомедицины, получаемые компьютерной томографией (КТ) в реальном масштабе времени [2].

На основе КТ образов были построены нелинейные модели и изучены динамические отклики аортальной артерии и сердца с искусственными или родными аортальными клапанами, которые могут быть полезными в понимании их реального состояния, возможных патологий и прогнозирования долговечности.

Математическое моделирование работы сердца, рис. 1, является сложной задачей главным образом потому, что сердечная функция включает в себя взаимосвязанные взаимодействия кровотока, сердечной стенки и сердечных клапанов. Сердечная ткань во время сердечного цикла подвергается при этом значительным деформациям из-за физиологических нагрузок, связанных с активным сокращением и расслаблением миокарда.

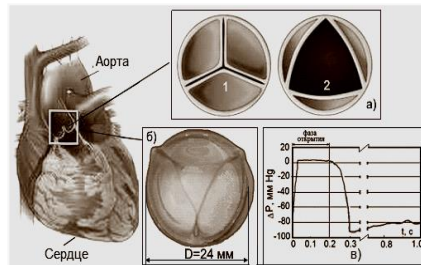


Рис. 1. Сердце и аорта: а) родной аортальный клапан в закрытом-1 и открытом-2 состоянии, б) искусственный клапан высотой  $H = 11$  мм, в) нагружение клапана

Выполнено моделирование работы трехстворчатого аортального искусственного клапана сердца, рис. 1 б, полагая известным, полученным экспериментально, нагружение его створок, рис. 1 в. Рассматривался изотропный неогуковский материал клапана. При этом внутренняя поверхность клапана нагружалась разностью давлений, действующих по обе стороны створок клапана. Точечные модели клапана построены на основе образов, полученных компьютерной томографией (КТ).

Изучение нелинейной динамики клапана выполнено для диапазона времени  $D_t = (0, 0.15)$  с., соответствующего полному циклу его работы. Шаг интегрирования по времени  $\Delta t$  принимался в соответствии с известным критерием устойчивости КФЛ и равен  $\Delta t = 1.0 \cdot 10^{-7}$  с. Картины раскрытия створок клапана и возникающие в них напряжения для различных моментов времени показаны на рис.2 а, б.

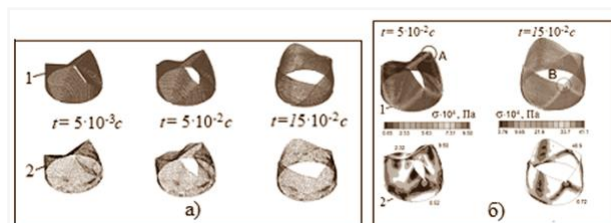


Рис.2. Раскрытие створок клапана – а) и напряжения в нем – б) во времени

Долговечность (жизненный ресурс) искусственного клапана сердца при условии такого функционирования составляет примерно  $3.5 \cdot 10^8$  срабатываний (циклов) или не менее 10 лет. Здесь же для сравнения приведены результаты, полученные МКЭ. Хорошее соответствие результатов подтверждает надежность используемого метода моделирования.

[1]. Vladimir A. Petushkov, Discrete a non-linear Hamiltonian dynamics models of hyperactive elastic deformable media// J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., 2013, Volume 6, Issue 2, 237–246.

[2]. В. А. Петушков, А. И. Надарейшвили Моделирование нелинейной динамики гамильтоновых систем в биомеханике с использованием образов компьютерной томографии// Матем. моделирование, 2014, том 26, номер 1, 109–121.

## Накопление повреждений при малоцикловом нагружении на стадии образования трещин

Романов А.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
alrom37@mail.ru

Накопление повреждений при циклическом упруго-пластическом деформировании оценивались по деформационным характеристикам циклического деформирования в сопоставлении с деформационным параметром несущей способности материала при статическом разрушении. Исчерпание несущей способности при циклическом нагружении происходит вследствие накопления повреждений и описывается в виде [1,2]:

$$\eta = \int_0^N \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}{\varepsilon_{st}^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{st}} dN, \quad (1)$$

В предельном случае:

$$\int_0^{N_f} \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}{\varepsilon_{st}^2} dN + \int_0^{N_f} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{st}} dN = 1. \quad (2)$$

Зависимость (2) может быть записана в виде:

$$\int_0^{N_f} \frac{\varepsilon_p^2}{\varepsilon_{st}^2} dN + \int_0^{N_f} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{st}} dN + \int_0^{N_f} \frac{\varepsilon_p \varepsilon_e}{\varepsilon_{st}^2} dN = 1, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация в полцикле растяжения,  $\varepsilon_{ep}$  – упругопластическая деформация,  $\varepsilon_e$  – упругая деформация, равная  $\varepsilon_e = \sigma_a/E$ ,  $\varepsilon_{st}$  – деформация однократного статического разрушения, соответствующая истинному пределу прочности (сопротивление отрыву) в момент потери устойчивости пластической деформации,  $N$  – текущее число циклов нагружения,  $N_f$  – число циклов до разрушения (образование трещины или потеря устойчивости пластической деформации).

Первый член в зависимости (3) определяет повреждение от пластической обратимой, второй – от накопленной пластической и третий от упругой деформаций.

Критерии (1) – (3) описывают исчерпание несущей способности материала. Несущая способность материала определяется по кривым статического разрушения в момент резкого падения нагрузки и начала ускоренного (неустойчивого) развития деформаций вследствие потери ее устойчивости.

В соответствии с зависимостью (3) могут быть оценены вклады в общее повреждение ( $\Sigma\eta=1$ ) от пластической, упругой и накопленной деформаций и определена кинетика накопления повреждений до предельного значения. Кривые усталости могут быть представлены в напряжениях и деформациях (рис.1,2).

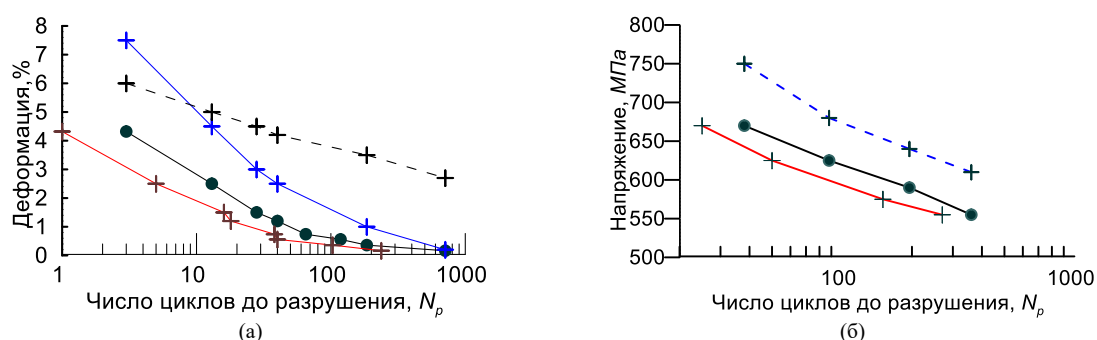


Рис. 1. Кривые усталости стали ТС (черные линии) и предельные кривые усталости (красные линии): (а) - при мягком нагружении в деформациях (синяя линия – предельная ширина петли гистерезиса, штриховая линия – предельно накопленная деформация) и (б) - жестком нагружении в напряжениях (штриховая синяя линия – предельные напряжения). Деформации и напряжения – в исходном полцикле растяжения.

Расчет на прочность целесообразно производить по предельным кривым усталости.

[1]. Романов А.Н. Разрешение при малоцикловом нагружении. Изд. "Наука", 1988 г. 280 с.

[2]. Romanov A.N. Damage accumulation and limit states under the low-cycle loading of structural softening steel, Engineering. Failure Analysis. 142 (2022) 106836. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106836>.

## Накопление повреждений при малоцикловом нагружении на стадии распространения трещин

Романов А.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
alrom37@mail.ru

Для описания условий разрушения используется силовые, деформационные и энергетические критерии. В основном они применяются для многоциклового усталости и хрупком разрушении. В качестве деформационных критериев делается попытка применить параметры раскрытия трещины и размер пластической зоны, которую при малоцикловом нагружении измерить чрезвычайно сложно, особенно при высоких температурах. В вершинах в условиях неоднородной деформации трещины протекают те же деформационные процессы (упрочнение, разупрочнение, стабилизация), что и при однородном малоцикловом нагружении, только в неоднородном поле напряжений. Все, что происходит в вершине трещины, отражается на перемещение ее берегов.

В связи с этим предлагается применить деформационно-кинетический критерий усталостного разрушения для случая распространения трещин в виде [1,2]:

$$\eta = \int_0^N \frac{v_{ep} v_p}{v_c^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta v}{v_c} dN. \quad (1)$$

В предельном случае:

$$\int_0^{N_f} \frac{v_{ep} v_p}{v_c^2} dN + \int_0^{N_f} \frac{\Delta v}{v_c} dN = 1, \quad (2)$$

Зависимость (2) позволяет рассмотреть вклад упругого, пластического и остаточного перемещения берегов (рис. 1) в общее предельно накопленное  $\Sigma\eta = 1$ ) повреждение при представлении зависимости (2) в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{v_p^2}{v_c^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta v}{v_c} dN + \int_0^{N_p} \frac{v_e v_p}{v_c^2} dN = 1, \quad (3)$$

где  $v_{ep}$  – упругопластическое перемещение берегов трещины в полцикле растяжения при максимальной нагрузке,  $v_p$  – пластическое (остаточное) перемещение берегов в полцикле растяжения (после разгрузки),  $v_e$  – упругое перемещение берегов трещины в полцикле растяжения,  $\Delta v$  – односторонне накопленное остаточное раскрытие берегов в цикле (после разгрузки со сжатия,  $v_c$  – предельное перемещение, соответствующее максимальной нагрузке при однократном разрыве образца с трещиной,  $N$  и  $N_f$  – текущее и разрушающее число циклов соответственно.

Несущая способность материала с трещиной определяется максимальной нагрузкой и соответствующей ей перемещением берегов при статическом разрушении образца с трещиной.

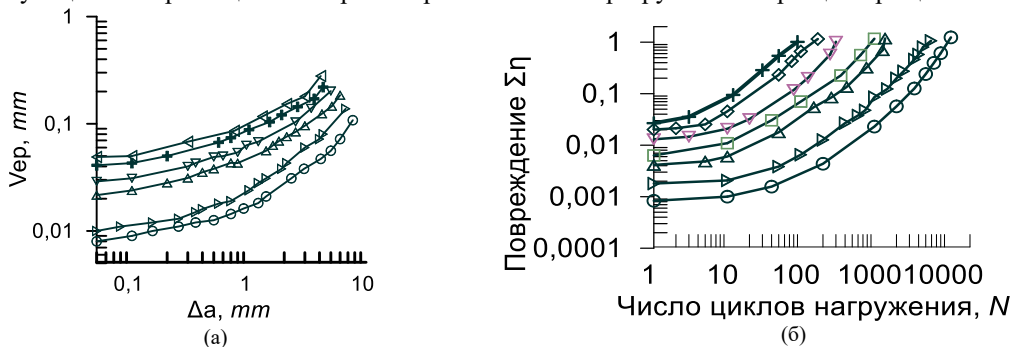


Рис.1. Перемещение берегов трещины в полцикле растяжения в зависимости от длины трещины (а) и характер накопления повреждений до предельного состояния (б) при малоцикловом нагружении перлитной стали.

Описание предельных состояний позволяет оценить и предоставить наряду с кривыми усталостного разрушения и кривых предельных состояний, также и критические параметры пластического, упругого и остаточного перемещения берегов трещин.

[1]. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. Изд. "Наука", 1988 г. 280 с.

# Влияние структурного измельчения на механические свойства алюминиевой бронзы при динамическом нагружении

<sup>1</sup>Столяров В.В., <sup>2</sup>Савенков Г.Г.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
vlstol@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Алюминиевая бронза БрАЖНМц 9-4-4-1 широко применяется в морском судовом машиностроении для изготовления элементов корабельной арматуры с повышенными требованиями к прочности (в том числе при ударных нагрузках) и износостойкости. Как правило, выполнение этих требований связано с поверхностным упрочнением высокоэнергетичными методами электродуговой наплавки, лазерной закалки и лазерного легирования. Альтернативным методом упрочнения может быть объемное структурное измельчение бронзы методами интенсивной пластической деформации, широко используемое в настоящее время [1]. К таким методам относится равноканальное угловое прессование (РКУП). Например, в [2] было установлено кратное повышение кратковременной прочности хромоциркониевой бронзы после динамического канального углового прессования (ДКУП) при сохранении удовлетворительной пластичности. Важным при этом является вопрос о сохранении высоких прочностных и пластических свойств материалов, полученных методом РКУП, при ударном нагружении. Цель исследования – оценить влияние повышенных скоростей деформации в интервале  $(0.9 - 1.8) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$  на механические свойства и деформационное поведение алюминиевой бронзы, подвергнутой РКУП.

Выполненные исследования показали, что РКУП бронзы в интервале температур 850 – 700 °С при угле пересечения каналов 120° по маршруту Вс [3] привело к уменьшению среднего размера зерен на порядок с 20 до 2 мкм (рис.1). Структурное измельчение привело к повышению предела текучести (на 15 – 30%), снижению относительного удлинения (на 25 – 45 %) при приблизительно равных скоростях деформации.

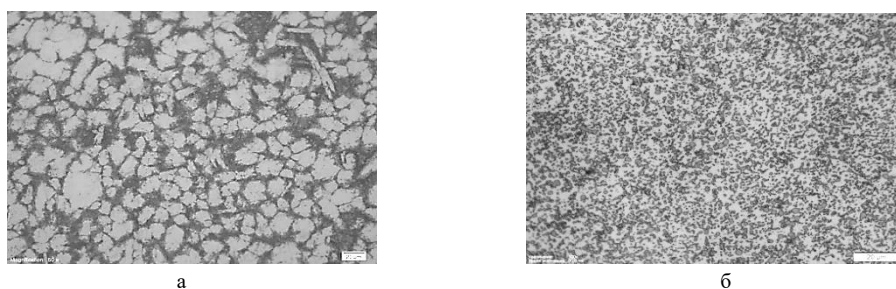


Рис. 1. Микроструктура бронзы до (а) и после (б) РКУП

Повышение скорости деформации в исследуемом интервале для крупнозернистого и микронанозернистого состояний способствовало заметному изменению и прочности и пластичности. Однако деформационное поведение сплава в обоих состояниях сильно отличалось и характеризовалось деформационным упрочнением и деформационным разупрочнением, соответственно (рис. 2).

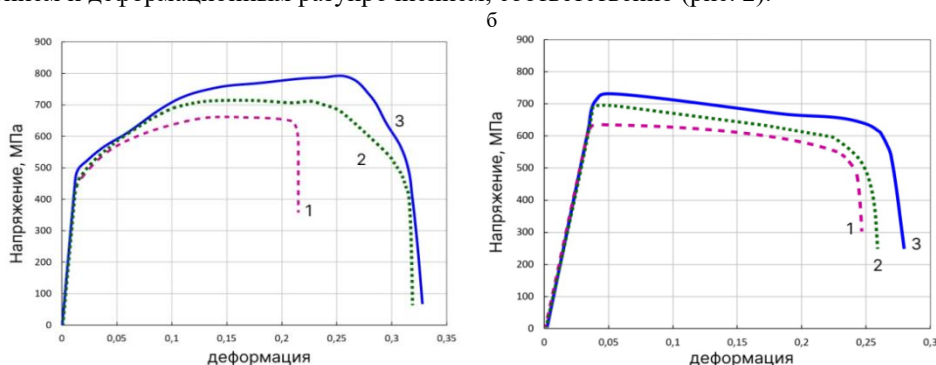


Рис.2. Деформационные кривые до (а) и после (б) РКУП: (а) 1 –  $\dot{\epsilon} = 915 \text{ c}^{-1}$ , 2 –  $\dot{\epsilon} = 1475 \text{ c}^{-1}$ , 3 –  $\dot{\epsilon} = 1620 \text{ c}^{-1}$ ;

(б) - 1 –  $\dot{\epsilon} = 1015 \text{ c}^{-1}$ , 2 –  $\dot{\epsilon} = 1445 \text{ c}^{-1}$ , 3 –  $\dot{\epsilon} = 1800 \text{ c}^{-1}$

[1], Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. Получение, структура и свойства, М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. 398с.

[2], Зельдович В.И., Добаткин С.В., Фролова Н.Ю и др. // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 1. С. 79 – 87.

[3]. Маркушев М.В. // Письма о материалах. 2011. Т. 1, №1. С. 36 – 42.

## **Использование традиционных металлорежущих станков в модульных технологических процессах**

*Сахаров А.В.*

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

klondikes@yandex.ru

В настоящее время в машиностроении стало доминировать многономенклатурное производство с разной серийностью выпускаемых изделий. Переход на выпуск нового изделия в этих условиях требует от технологической обрабатывающей системы, к которой, в частности, относится станочное оборудование высокой гибкости и высокой производительности. Гибкостью станочного оборудования называется его способность перестраиваться под изготовление новой детали. В связи с этим представляет интерес анализ гибкости станочного оборудования различного уровня специализации.

По уровню специализации существующие станки делятся на универсальные, специализированные и специальные (операционные). Применяемые в единичном и мелкосерийном производстве универсальные станки отличаются высокой гибкостью и невысокой технологической производительностью из-за последовательной обработки поверхностей деталей. Специализированные станки, используемые в среднесерийном производстве для изготовления типовых поверхностей деталей машин, отличаются высокой производительностью и низкой гибкостью. Например, резьбонарезной станок позволяет нарезать резьбу определённого типа с определённым диапазоном диаметров.

Специальные станки, применяемые в массовом производстве, отличаются высокой производительностью за счёт совмещения переходов во времени и полным отсутствием гибкости, когда даже незначительные изменения в конструкции изготавливаемой детали не позволяют использовать специальный станок.

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что существующие станки различного уровня специализации не сочетают в себе одновременно и высокой гибкости, и высокой производительности. Это не позволяет предприятиям оперативно переходить на выпуск новых изделий.

Для решения этой проблемы необходимо воспользоваться модульным принципом построения машиностроительного производства и создавать станки не под изготовление отдельных поверхностей или деталей, а под изготовление модулей поверхностей (МП) под которыми понимаются сочетания поверхностей, объединённых совместным выполнением определённой служебной функции детали. Согласно классификации, насчитывается двадцать шесть видов МП, разделённых на три класса: базирующие, рабочие и связующие. Каждый МП имеет свой ряд типовых конструкций, а каждая конструкция свою классификацию по размерам и точности.

Под каждый вид МП создается своя гамма станков, охватывающих определённые диапазоны характеристик данного МП. Высокая гибкость таких станков достигается за счёт возможности изменения их специализации по изготавливаемым МП в зависимости от типа производства, а высокая производительность – за счёт компоновки рабочих органов станка.

Поскольку в настоящее время такие станки еще не созданы, то целью данной работы стало определение возможности применения традиционных станков в условиях модульной технологии. Для достижения оставленной цели работы необходимо определить, какие МП могут быть изготовлены на этих станках.

С целью решения этой задачи была разработана методика определения технологических возможностей станков по изготовлению МП. Она включает в себя сбор исходных данных о станке: реализуемые методы обработки, применяемый режущий инструмент и технические характеристики станка. Затем необходимо последовательно выполнить следующие этапы:

- определение поверхностей, изготавливаемых на станке;
- определение видов МП по составу поверхностей, изготавливаемых на станке;
- определение соответствия положений поверхностей в конструкциях МП с их положениями в рабочем пространстве станка при изготовлении;
- определение диапазонов размеров МП, получаемых на станке;
- определение достижимой точности изготовления МП на станке.

С помощью данной методики были успешно определены технологические возможности станков токарной, фрезерной, сверлильной и шлифовальной групп [1,2,3].

Проведённое исследование показало, что традиционное станочное оборудование может быть использовано в модульных технологических процессах. Для этого необходимо определить технологические возможности данных станков по изготовлению МП.

[1]. Сахаров, А. В. Определение технологических возможностей токарного обрабатывающего центра / А. В. Сахаров, Н. А. Родионова // Станкоинструмент. 2019. № 4(17). с. 36-41. – DOI 10.22184/2499-9407.2019.17.04.36.40.

[2]. Сахаров, А. В. Определение технологических возможностей вертикального фрезерного обрабатывающего центра / А. В. Сахаров // Станкоинструмент. 2020. № 4(21). с. 48-53. – DOI 10.22184/2499-9407.2020.21.04.48.52.

[3]. Сахаров, А. В. Определение технологических возможностей универсальных станков шлифовальной группы / А. В. Сахаров // Станкоинструмент. 2021. № 4(25). с. 32-37. – DOI 10.22184/2499-9407.2021.25.4.32.36.

## Значение виброакустического воздействия в появлении электропластического эффекта

Сташенко В.И., Скворцов О.Б.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
vis20-11@rambler.ru

Явление резкого снижения сопротивления металла деформированию и повышение пластичности при пропускании импульсов тока было установлено Троицким О.А. в 1969 г. и получило название электропластического эффекта (ЭПЭ). Опыты проводились на кристаллах цинка с прохождением импульсов тока при растяжении и комнатной температуре, а также при сжатии и температуре  $\sim 78^\circ \text{K}$ . Скачки деформации начинались с пороговых значений плотности тока  $500 \text{ A/mm}^2$  и длительностях импульсов порядка  $10^{-4}$  с. Скачки деформирующего усилия, являлись результатом пластической деформации кристаллов так как синхронно с импульсами тока на поверхности кристаллов появлялись свежие полосы скольжения и в результате действия тока происходило измельчение пачек скольжения кристаллов. Аномально большая величина пиков ЭПЭ возникала на пределе текучести кристаллов [1]. Обосновывалось, что причиной деформации кристаллов не являлась тепловая активация образцов за счет нагрева. Эффект довольно подробно изучается экспериментально и теоретически. Он находит применение в технологиях обработки металлов давлением [2]. Электропластическая деформация металла включает в себя разные физические процессы, которые требуют непротиворечивого описания и возможности выбора рациональных критериев применения. Не смотря на успешные технологические применения электромагнитных воздействий, на металлы дискуссии относительно механизмов продолжают.

Силовое электродинамическое действие магнитного поля импульса тока на проводник приводит к механическим напряжениям в нем с начало в поверхностных слоях, из-за скин-эффекта, а затем с ростом амплитуды тока в объеме проводника включая также пинч- эффект. Эти эффекты изучены теоретически [3]. Экспериментальные исследования влияния пондеромоторных сил на проводник при электропластической деформации проводились при синхронном измерении магнитных полей и вибраций на поверхности проводника высокочастотными датчиками [4]. Установлено, что электрический импульс, действуя на металл, вызывает в нем механические колебания [4]. Первоначально происходит механический удар в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса. Характерным явилось возникновение значительных по величине до  $1000 \text{ м/с}^2$ , но коротких (10-20мкс) импульсов ускорения поверхностных слоев. Импульсы по времени были привязаны к начальным моментам переднего и заднего фронтов электрического импульса. Короткие ударные импульсы быстро заканчивались. Здесь на переднем фронте величина тока через образец из-за влияния индуктивности цепи и скин - эффекта очень мала. Незначительны и тепловые эффекты. Малая величина тока не позволяет объяснить большие ускорения в радиальном и в осевом направлениях образца. Измерение ускорений позволяло оценить быстропротекающие механические процессы. Каждый ударный импульс порождал затухающий колебательный процесс, а при небольшой длительности электрического импульса эти колебательные процессы накладывались. Виброакустические колебания, распространяясь по длине проводника, вызывают упругие и/или пластические деформации. Видимо, эти процессы и формируют электропластический эффект.

Установлены: линейная зависимость величины вибрационного отклика от амплитуды электрического воздействия, изгибные формы колебаний, а также полярность отклика от полярности электрического действия. Возникающие в процессе воздействия вибрации не связаны с плавным нарастанием электрического тока через проводник, а также с постоянным уровнем тока во время действия электрического импульса. Броски вибраций на начальных участках фронтов импульса, видимо, являются следствиями динамических эффектов из-за самоиндукции и вносят основной вклад в силовое действие электрического тока на металл. Установленные закономерности не вызваны скин-, пинч-, пондеромоторным или тепловыми эффектами на проводник, а являются независимыми эффектами импульсного электрического действия тока на металл. Из полученным данным следует, что вклад тепловых деформаций, а также пинч-эффекта в деформацию проводника, для плотностей тока  $400\text{-}5000 \text{ A/mm}^2$  и длительностей от 50 до 250 мкс малозначителен и не являются доминирующим. Тепловая деформация образца и пинч эффект имеют неполярный характер с квадратичной зависимостью от амплитуды электрического воздействия и тем неимение не дают вклада в общую деформацию. При более высоких уровнях электрического воздействия по длительности и амплитуде вклад теплового и пинч-эффектов и др. может стать заметным, так как их силы пропорциональны квадрату амплитуды электрического воздействия.

[1]. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах. Изд-во «Ким Л.А.», М., 2021. - 467 с.

[2]. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / М.: Изд-во МГИУ, 2001. – 843 с.

[3]. Рошупкин, А. М., Батаронов И. Л. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311.

[4] Троицкий О., Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Измерение вибраций, созданных импульсами тока в элементах электротехнических конструкций // Электротехника. 2018. № 3. С. 8-12.

## **Виброакустическая модель электропластического эффекта** **Скворцов О.Б., Сташенко В.И.**

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
oleg.b.skvorcov@gmail.com

В работе предлагается модель электропластического эффекта [1] с использованием принципов, которые основаны на критическом анализе существующих гипотез и экспериментальных данных [2], полученных при изучении виброакустического отклика проводника на действие электрического импульса.

Актуальность нового подхода определяется тем, что:

- необходимо объяснить процессы, наблюдаемые при изучении взаимодействии электрического импульса с материалом проводника;
- понимание физики происходящих процессов необходимо для осознанного выбора режимов при использовании электропластического эффекта, обеспечивая максимальную его эффективность;
- адекватная модель происходящих в проводнике процессов должна обосновывать сходство с экспериментальными результатами явления электропластичности и для обработки металлов давлением с применением локального интенсивного воздействия высокочастотной вибраций;
- предлагаемая модель не должна противоречить наблюдаемым данным и существующим представлениям о физике процессов и должна быть применима к случаям использования ЭПЭ для разных металлов и сплавов, находящихся в различных состояниях. Она не должна основываться на наличии у материала образца каких-либо особенностей, например нескольких фазовых состояний или присутствия парамагнитных примесей;
- модель не должна противоречить опытным данным о родственных процессах при взаимодействии электрического импульса с проводником, например, объяснять движение проводника в опытах Пьера Грено.

Существующие теории не удовлетворительно описывают наблюдаемые при электропластичности деформации физические процессы. В работе [3] отмечено, что имеющиеся модели взаимодействия дислокаций с «электронным ветром» и их движения за счет электрического взаимодействия, возможно, физически несостоятельны, а гипотезы, связанные в локальным выделением джоулева тепла не согласуются с экспериментальными данными. При этом приведенные данные в [3], основанные на токовых пульсациях также не подтверждаются в экспериментах.

Для получения непротиворечивого описания происходящих процессов предлагается виброакустическая модель теории электропластичности, основанная на следующих положениях:

- действие электрического импульса представляется как действие последовательности двух ступенчатых изменений внешнего электрического воздействия противоположной полярности;
- в моменты скачков внешнего электрического воздействия в материале проводника формируется кратковременный механический ударный процесс, который затем сопровождается затухающими виброакустическими колебаниями;
- при изменении полярности ступенчатого электрического воздействия происходит смена полярности ударного и виброакустического отклика;
- при сравнительно малых длительностях импульсного электрического внешнего воздействия происходит суперпозиция откликов от переднего и заднего фронтов электрического импульса, когда механические колебания не успевают затухнуть;
- механическое действие электроимпульсного проявляется и для единичного электрического импульса в течение, которого выделение тепла из-за джоулевского нагрева незначительно и не влияет на протекающие процессы;
- происходящие физические процессы характеризуются наличием признаков «отрицательной обратной связи», оказывая стабилизирующее и линеаризирующее влияние;
- рассматриваемые ранее физические процессы в качестве механизмов электропластического эффекта могут присутствовать, однако не вносить заметного вклада в величину эффекта. Например, скин-эффект может наблюдаться или отсутствовать, но сам электропластический эффект присутствует в этих двух случаях.

Ударный механический отклик на ступенчатое электрическое воздействие, определяется действием сил Лоренца на свободные электроны проводимости, приводя к появлению радиального поля Холла и кратковременному радиальному току поляризации. При этом возникают силы Ампера, вызывая продольное силовое воздействие на проводник. Возникший продольный механический удар, распределяется по всей длине проводника, приводя к виброакустическим колебаниям материала, вызывая упругие и/или пластические деформации.

[1]. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // Изд-во «Ким ЛА.», М.: 2021467 с.

[2]. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Электропластический эффект и взаимодействие электрического импульса с проводником // Письма о материалах, Т.11. № 4. 2021. с. 473–478.

[3]. Sutton A.P., Todorov T.N, Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction // *Physical review materials*, 2021. Vol. 5. № 11. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.113605>



## Вибрация электропроводящих элементов оборудования

Скворцов О.Б., Сташенко В.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия  
oleg.b.skvorcov@gmail.com

Эксплуатация промышленного электрического оборудования связана с необходимостью обеспечения его надежной работы, Вибрация такого оборудования является важным фактором, определяющим процессы усталостных повреждений [1]. Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций широкое распространение получили методы и средства мониторинга вибрации [2]. При оценке действия вибрации на образование и развитие повреждений следует учитывать, что воздействие на материалы аддитивных вибрационных нагрузок приводит к синергизму и ускоренному развитию дефектов [3, 4]. Особое место при этом занимает вопрос вибрационного влияния на прочность электропроводящих элементов энергетического оборудования, использующего передачу электрической энергии с широтно-импульсным регулированием частоты [5]. Вибрация такого оборудования определяется как низкочастотными составляющими (как вибрационные перемещения и деформации), так и высокочастотными составляющими (как локальные виброперегрузки). Достоверный контроль вибрационного состояния в этих условиях требует параллельного отслеживания как вибрационных перемещений, так и вибрационных ускорений. Другая особенность рассматриваемого случая вибрационного мониторинга состоит в том, что электропроводящие элементы могут сами служить источником вибрации. Взаимодействие проводников с током приводит к их вибрации в поперечном направлении с удвоенной рабочей частотой тока из-за эффекта близости. При воздействии электрических импульсов на одиночный проводник. В этом случае в проводнике наблюдается силовое действие в осевом направлении. Это действие может быть измерено датчиком динамической силы, закрепленном на проводнике, как показано на рис. 1.

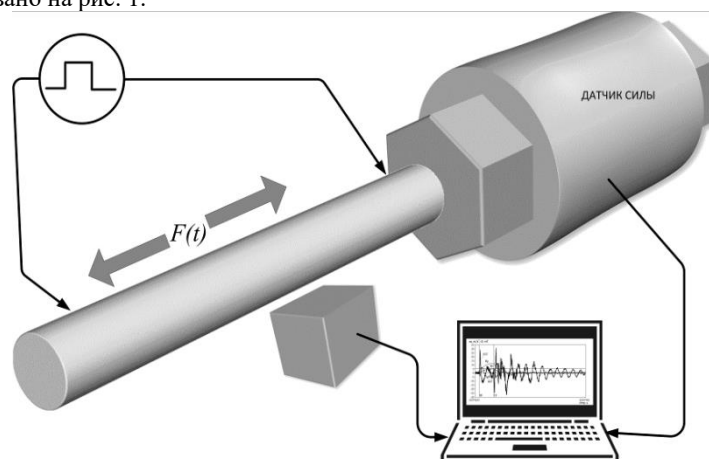


Рис. 1. Контроль осевой динамической силы  $F(t)$  при воздействии на проводник электрического импульса

Осевое ударное воздействие создает в проводнике затухающие виброакустические колебания в виде перемещений (деформаций) и вибрационных перегрузок как в продольном, так и в поперечном направлениях, которые можно оценить по сигналам высокочастотных акселерометров, установленных на проводнике. Синхронная оценка изменений тока через проводник обеспечена использованием бесконтактного датчика Холла.

Рассмотренные особенности формируют многочастотное вибрационное воздействие на проводник в продольном и поперечном направлениях, для контроля возможных повреждений от которого требует мониторинга пространственной вибрации проводящих элементов. Комбинация поперечных и продольных вибраций проводников создает условия для появления в контактных соединениях проводников фреттинг-коррозии [6].

При мониторинге технического состояния проводниковых элементов необходимо контролировать температуру их поверхности с использованием контактных или без контактных датчиков температуры. Повышение температуры может быть связано при этом как с выделением тепла пропорционально квадрату величины тока, а также с выделением тепла в материале при наличии высокочастотных механических колебаний, как это наблюдается при испытаниях материалов на высокочастотное нагружение.

[1] Bathias C., Pineau A. Fatigue of materials and structures // ISTE Ltd., London, UK, 2011. 313 p.

[2] Randall R.B. Vibration-based condition monitoring. Industrial, aerospace and automotive applications // John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 309 p.

[3] Бусько В.Н. Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения. Приборы и методы измерений. 2015. 6(2). с.181–187.

[4] Заверюха Г.Г. Определение усталостной долговечности конструктивных элементов при бигармоническом процессе нагружения // Ученые записки ЦАГИ. Т. IV. 1973. с.85–96.

[5] Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Усталостные и релаксационные процессы в металлах при электроимпульсном воздействии // Сборник трудов конференции «Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2023)», РТУ МИРЭА. 2023. с.128–133.

[6] Албагачиев А.Ю., Скворцов О.Б. Виброакустический мониторинг процессов фреттинг-коррозии // Молодежный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2023. Том 3. № 2. с. 29–36.

## Регулирование вибродемпфирующих свойств амортизирующих полимерных элементов железнодорожных инфраструктурных объектов

<sup>1</sup>Семак А.В., <sup>1</sup>Курзина Н.М., <sup>1</sup>Арутюнян Д.Р., <sup>1</sup>Курзина Е.Г., <sup>2</sup>Колмаков А.Г.

<sup>1</sup>Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

kurzina\_elena@mail.ru

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва, Россия

### Цель

Безопасная эксплуатация инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта во многом зависит от эффективной изоляции и гашения динамических колебаний многомассовой системы «железнодорожный путь-подвижной состав». С этой целью под подошву рельса устанавливают подрельсовые амортизирующие прокладки, на бетонные опорные блоки метрополитена одевают резиновые чехлы, а, в последнее время предложено применять упругие демпфирующие прокладки под шпалами. Известно, что степень гашения колебаний напрямую зависит от толщины амортизирующего элемента. Однако, в сложных эксплуатационных условиях: высокие осевые нагрузки, наличие кривых малого радиуса, затяжных подъемов и спусков, излишняя толщина демпфирующего полимерного элемента приводит к расстройству пути: уширениям, разуклонке и выходу из строя других элементов. В связи с чем возникла необходимость регулирования статической и динамической жесткостью амортизирующих полимерных элементов, а значит и вибродемпфирующих свойств железнодорожного пути.

### Результаты исследований

С этой целью рассмотрено влияние армирования резиновой смеси короткими органическими волокнами (рис.1а) и синтетическими сферическими гранулами (рис.1б) на изменение упруго-гистерезисных свойств образцов композиционного материала.

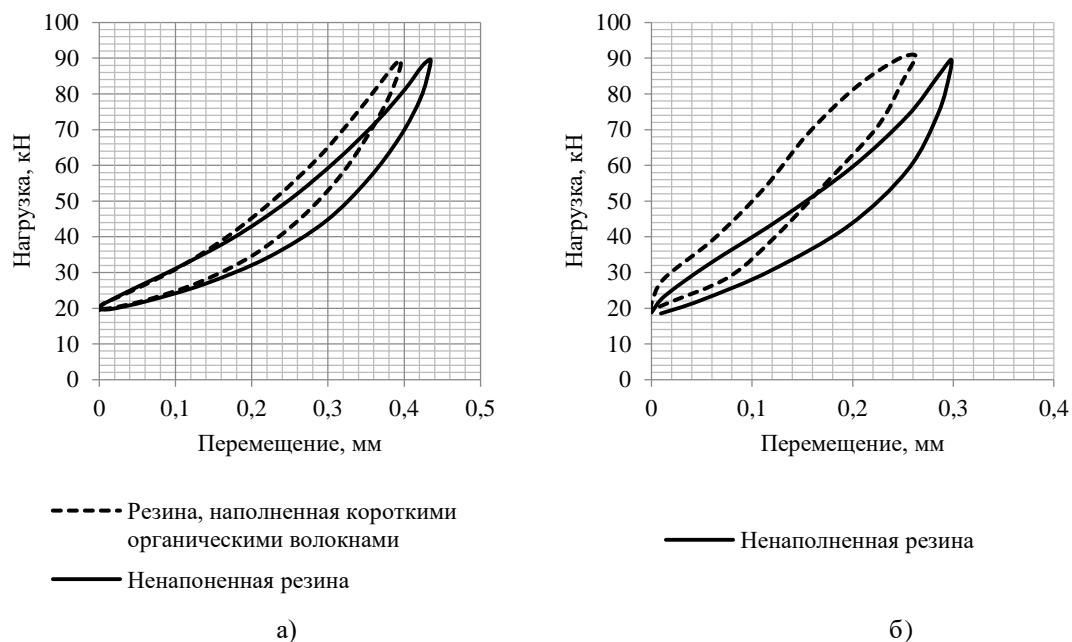


Рис.1. Динамические гистерезисы резиновых композитов, толщиной 14 мм (а) и 10 мм (б) при температуре +23 °С в сравнении с ненаполненной резиной

Результаты исследований показали, что динамическая жесткость при частоте приложения нагрузки 10 Гц наполненных резиновых композитов в 1,2 раза выше ненаполненной, что связано с меньшим объемом эластичной матрицы и быстрым уплотнением границ между основной матрицей и кордовым наполнителем при циклическом воздействии. При понижении температуры до -40 °С различие между параметрами жесткости ненаполненной и наполненных резин практически исчезает, что связано с нарушением аддитивного действия компонентов, а также началом процесса кристаллизации резиновой матрицы, при котором жесткость основной матрицы и наполнителя становятся практически соизмеримы. Механические потери за цикл деформации резинового композита, наполненного синтетическими сферическими гранулами больше, чем у ненаполненной резины и наполненной короткими органическими волокнами, что связано с дополнительной работой упругих сферических гранул.

### Выводы

Таким образом, регулирование вибродемпфирующих свойств амортизирующих полимерных элементов железнодорожных инфраструктурных объектов возможно путем введения в состав резины волокнистых и сферических наполнителей, что позволит применять наполненные композиты в тяжелых условиях эксплуатации без ухудшения параметров железнодорожного пути, а ненаполненные – на остальных участках. Следует отметить, что применение синтетических сферических гранул в качестве наполнителя резин позволит рассеивать большую энергию за цикл деформации.

## Метод оценки технологичности конструкции изделия до технологической подготовки производства

Троицкий А. А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
aleks146@mail.ru

Обеспечение технологичности конструкции изделия (ТКИ) позволяет существенно снизить трудоёмкость и себестоимость его изготовления. Особенно важным и одновременно трудным является повышение уровня технологичности конструкции изделия после разработки рабочей конструкторской документации (РКД) до технологической подготовки производства (ТПП), когда не известны технологические процессы изготовления изделия, а следовательно и трудоёмкость его изготовления.

Ошибки в оценке уровня ТКИ приводят к неправильному установлению степени влияния характеристик конструкции изделия (КИ) на трудоёмкость, снижает эффективность процесса отработки КИ на технологичность. Поэтому оценка ТКИ должна показывать не только её уровень, но и степени влияния характеристик КИ на один из важнейших показателей – трудоёмкость изготовления изделия. Это информация, позволит определять с каких характеристик КИ, и в какой последовательности надо улучшать её до заданного уровня технологичности.

В связи с изложенным целью работы является повышение уровня технологичности конструкции изделия на этапе разработки его рабочей конструкторской документации до ТПП.

Для решения поставленной цели был установлен перечень и выведены расчетные формулы следующих коэффициентов технологичности: покупаемости, заимствования, повторяемости деталей, повторяемости соединений, типизации деталей, точности деталей КИ, шероховатости поверхностей деталей, твердости материала деталей, массы деталей, соединений, методов достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей [1].

В связи с тем, что расчетные формулы коэффициентов технологичности отражают степень влияния характеристики КИ на полную трудоёмкость изготовления изделия, становится возможным определение уровня ТКИ, посредством суммирования коэффициентов технологичности.

Уровень ТКИ рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{ТКИ} &= \sum K_i, \\ K_i &= a_i b_i L_i, \end{aligned}$$

где  $K_i$  – коэффициент технологичности  $i$ -ой характеристики конструкции изделия;  $a_i$  – степень влияния  $i$ -ой характеристики конструкции изделия на вид трудоёмкости (трудоёмкость ТПП или изготовления);  $b_i$  – степень влияния  $i$ -ой характеристики конструкции изделия на трудоёмкость;  $L_i$  – относительное значение  $i$ -ой характеристики конструкции изделия.

Далее решалась задача определения точности расчета уровня ТКИ предложенным методом оценки. Проблема определения точности расчета уровня ТКИ заключается в том, что отсутствует информация о минимальной трудоёмкости изготовления этого изделия, при котором уровень ТКИ равен единице.

В связи с этим определения точности расчета уровня ТКИ производилось по следующая методике определения погрешности расчета уровня ТКИ предложенным методом суммирования коэффициентов технологичности. В её основу была положено, определение погрешности расчета уровня ТКИ, как разницы между отношениями трудоёмкостей и уровнями ТКИ двух изделий. Результаты расчетов погрешностей оценки уровней ТКИ показали, что она не превышает 14%.

Данный метод позволяет не только повысить точность определения уровня технологичности конструкции изделия, но и установить регрессионный ряд характеристик конструкции изделия по степени их влияния на снижение трудоёмкости изготовления изделия [2].

В результате становится возможным, определить с какой характеристики, в какой последовательности и до какой характеристики конструкции изделия надо улучшать значение уровня технологичности конструкции изделия до достижения его заданного уровня.

[1]. Базров Б. М. Троицкий А. А. Преобразование коэффициентов технологичности при их групповом влиянии на трудоёмкость изготовления изделия. Технология машиностроения. 2020. № 11 (113). с.70-75.

[2]. Базров Б. М. Троицкий А. А. Метод повышения эффективности процесса отработки изделия на технологичность на этапе разработки его конструкторской документации. Вестник машиностроения. 2023. № 2. с. 161-166.

## Экспериментальные методы определения пористости материалов с помощью жидкостного экструзионного порозиметра

<sup>1</sup>Фомина Е.И., <sup>1,2</sup>Худорожко М.В., <sup>1,2</sup>Думанский А.М.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;  
89150682218@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Полимерные композиционные материалы получили большое распространение в аэрокосмической отрасли, в строительстве, медицине, транспорте, авто- и судостроении. В настоящее время вопрос использования методов диагностики материалов для определения их технического состояния становится все более актуальным. Анализ параметров пористости приобретает ключевое значение в данном контексте, поскольку благодаря этим данным можно получить полное представление о структуре материала конструкции.

Поры в материале могут рассматриваться как дефект, или как часть регулируемой структуры. Примером является, что увеличение пористости материала негативно сказывается на его характеристиках. При достижении уровня пористости 1%, прочность уменьшается на 5%, а усталостная долговечность сокращается на 50%. В самолетостроении, если пористость силового элемента превышает допустимое стандартом значение, изделие будет забраковано. Тогда как в других сферах регулирование пористости позволяет подобрать лучшие эксплуатационные характеристики.

Таким образом, структура пор и величина пористости является одним из параметров, с помощью которого можно контролировать некоторые свойства, например, физические и механические свойства, тепло- и электропроводности, энергию разрушения и ударную вязкость, а также процесс распространения трещин и термические напряжения при повышенных температурах.

Существует более 60 методов измерений характеристик пористых структур, основанных на различных физических и физико-химических принципах. Открытую пористость можно изучать методами световой микроскопии, капиллярной порометрии, термoporометрии, жидкостной и газовой волнометрии, заполнения пор жидкостью, рассеяния рентгеновского излучения, ультразвукового отражения и другими.

Целью данной работы является исследования материалов с помощью жидкостного экструзионного порозиметра LEP-100A.

С помощью жидкостного экструзионного порозиметра LEP-100A определяются следующие параметры пористости: объем пор, распределение пор по объемам, усредненный диаметр пор и проницаемость. Этот метод позволяет измерять только объем и диаметр сквозных пор, глухие и закрытые поры не учитываются. Для оценки размера пор используется понятие диаметра поры. Обычно диаметр определяется как условный диаметр цилиндрической поры или как отношение объема поры к ее поверхности, так называемый гидравлический диаметр.

В камеру порозиметра, образующую систему сообщающихся сосудов с аналитическими весами, на мембрану помещается заранее пропитанный смачивающей жидкостью образец. Мембрана подбирается с расчетом, чтобы её наибольшая пора была меньше самой маленькой поры исследуемого образца. Жидкость вытесняется из сквозных пор всё нарастающим давлением и с помощью прецизионных весов вычисляется объём вытесненной жидкости. Дифференциальное давление  $p$  соотносится с усредненным диаметром пор  $D$ :

$$D = \frac{4\gamma \cos \theta}{p}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – поверхностное натяжение смачивающей жидкости,  $\theta$  – угол контакта, являющийся мерой смачивания твердого вещества жидкостью.

При небольшом давлении жидкость вытесняется из пор большего размера, затем по мере нарастания давления – из меньших. Мембрана препятствует прохождению газа через образец, так как для вытеснения жидкости из ее пор требуется большее давление, чем для любой поры образца.

По значениям объема вытесненной из пор жидкости рассчитывается объем пор и их распределение. Пики максимумов кривой функции распределения показывают наиболее вероятные средние значения диаметров пор. Проницаемость образца определяется с помощью измерения потока жидкости через образец без мембраны.

[1]. Rice, R. W. Porosity of ceramics: Properties and applications / R. W. Rice // Porosity of Ceramics: Properties and Applications, 2017. p. 1-539.

[2]. Определение пористости в монолитных конструкциях из углепластиков ультразвуковым эхо-методом с использованием лазерного возбуждения ультразвуковых колебаний / А. С. Бойчук, В. В. Мурашов, В. Ю. Чертищев, И. А. Диков // Труды ВИАМ. – 2016. – № 12(48). – С. 10.

[3]. Душин, М. И. Параметры, влияющие на образование пористости в изделиях из полимерных композиционных материалов, изготавливаемых безавтоклавными методами (обзор) / М. И. Душин, А. В. Хрульков, Р. Ю. Каравас // Труды ВИАМ. 2015. № 2. с. 10.

[4]. Сапега, Е. А. Исследование влияния пористости на физико-механические свойства углепластика в авиационных конструкциях / Е. А. Сапега // Гагаринские чтения 2017 Тезисы докладов, Москва, 05–19 апреля 2017 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) / 2017. с. 420-421.

[5] Оборудование ЦПК-1 ИМАШ РАН : офиц. сайт. — URL: <http://imash.ru/nauka-dejt/ckp/oborudovanie-tskp-1/> (дата обращения: 20.10.2023).

## Установка концентрированного радиационного нагрева для испытаний высокотемпературных композиционных материалов

<sup>1,2</sup>Худорозко М.В., <sup>2</sup>Просунцов П.В.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;  
khudorozko.mixa@gmail.com

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

В настоящее время разрабатываются перспективные изделия авиационной и ракетно-космической техники элементы которых подвергаются воздействию высокоэнтальпийного потока воздуха, под действием которого их поверхность нагревается до температур, превышающих 2000 К [1]. Поэтому остро стоит проблема обеспечения температурного режима теплонагруженных элементов конструкции. В настоящее время все больше применяются так называемы «горячие» конструкции, в которых высокотемпературный материал воспринимает одновременно и силовые и тепловые нагрузки [2]. Рабочая температура высокотемпературных композиционных материалов на основе боридов и карбидов неметаллов (англ. УНТС) может достигать 2800 К [3].

Создание подобного рода конструкций невозможно без проведения масштабной экспериментальной отработки, для которой требуется наличие соответствующей технической и испытательной базы. На сегодняшний день для испытания образцов и элементов конструкций из керамических материалов используется достаточно широкий спектр установок газодинамического и радиационного нагрева. Наибольшее распространение получили установки радиационного нагрева на основе трубчатых галогенных ламп [4]. Так, в [5] представлен проект установки радиационного нагрева, которая позволяет достигать уровня рабочих температур на поверхности образца в 2000 К. Расчеты показывают, что установки этого типа работают практически на пределе своих возможностей поскольку, дальнейшее увеличение мощности приводит к перегреву колб ламп с последующим выходом их из строя.

Дальнейшее повышение рабочей температуры на поверхности испытываемых образцов материалов и элементов может быть достигнуто на основе использования принципа концентрации излучения от большого количества источников излучения. В качестве таких могут выступать как галогенные, так и газоразрядные шаровые лампы. Однако на сегодняшний момент отсутствуют методики как моделирования полей температуры и излучения в рабочих зонах установок подобного типа, так и методики их проектирования. Использование эмпирического подхода к созданию установок может привести к перебору большого количества вариантов при отсутствии гарантии получения оптимального результата.

Предложена методика проектирования установки концентрированного радиационного нагрева, основанная на решении геометрической обратной задачи с использованием современных алгоритмов глобальной оптимизации. Формулировка обратной задачи предусматривает минимизацию квадратичного функционала невязки заданных и расчетных значений величин падающего потока излучения на поверхности объекта испытаний.

На основе теории переноса излучения в системе излучающих и отражающих поверхностей была разработана аналитическая модель расчета плотности падающего потока от единичного источника излучения цилиндрической формы с эллиптическим отражателем. Определение падающего потока на объект испытаний сводится к численному интегрированию выражения, что позволяет существенно повысить скорость расчета по сравнению с традиционным подходом, основанным на методе конечных элементов. Полученные соотношения позволяют эффективно в вычислительном отношении определить зависимость падающего теплового потока от геометрических параметров и оптических характеристик элементов источника излучения. Показано хорошее соответствие результатов, вычисленных с помощью данной модели и с использованием метода конечных элементов.

Результаты доказывают теоретическую возможность создания установки концентрированного радиационного нагрева для испытаний высокотемпературных композиционных материалов, с уровнем температуры до 2100 К.

[1] Суздальцев Е.И. Керамические радиопрозрачные материалы: вчера, сегодня, завтра. Новые огнеупоры, 2014. № 10. с. 130–133.

[2] Аронов, Д.И. Перспективные методы организации тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов / Д.И. Аронов, В.А. Клягин // Вестник Концерна ВКО "Алмаз–Антей". 2021. № 1(36). с. 52–66.

[3] Justin J.-F., Julian-Jankowiak A., Guérineau V., Mathivet V., Debarre A. Ultra-high temperature ceramics developments for hypersonic applications. CEAS Aeronautical Journal. 2020. vol. 11. pp. 651–664.

[4] Елисеев В.Н. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2011. № 1 (82). с. 57–70.

[5] Балджиев Р.С., Просунцов П.В., Резник С.В. Разработка стенов радиационного нагрева для испытания образцов керамических материалов с уровнем температур до 2000 К. Ключевые тренды в композитах: наука и технологии: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Москва, Диона. 2018. с. 68–73.

*Секция №4*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических направлений развития трибологии: трения, износа, смазок.**

**Председатель – Албагачиев А.Ю., д.т.н., профессор; Буяновский И.А., д.т.н.**

**Секретарь – Тохметова А., Стрельникова С.С., [aygerim.tokhmetova@mail.ru](mailto:aygerim.tokhmetova@mail.ru)**

## Модернизированная машина трения

Абрамов А.Н.\*, Шолом В.Ю., Тюленев Д.Г., Абрамов К.А., Пилюгин С.М.

Хозрасчётный творческий центр уфимского авиационного института, г. Уфа, Россия.

\*Abramov@rosoil.ru

### Цель

Повышение информативности, точности и достоверности получаемых результатов экспериментальной оценки противозадирных и антифрикционных свойств испытываемых материалов на машине трения.

Для достижения поставленной цели была проведена модернизация известной машины трения (рис1), в результате которой радиальная сила на узел трения («ролик – кольцо» или «брусочек – кольцо») создается механизмом плавного нагружения, а оценку противозадирных и антифрикционных свойств смазочных материалов определяют в момент схватывания трущихся образцов, в результате которой происходит остановка вала электродвигателя. Сила трения, возникающая между трущимися образцами, измеряется силоизмерительным датчиком.

Результаты испытаний противозадирных, антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов с различным содержанием противозадирных, антифрикционных и противоизносных присадок приведены в таблице 1.

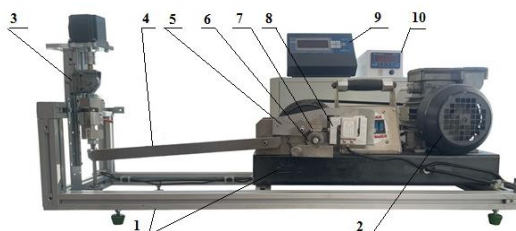


Рис. 1. Внешний вид модернизированной машины трения для определения противозадирных, антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов: 1-станина, 2-электродвигатель, 3 - система плавного нагружения узла трения, 4 - рычаг, 5 - рычаг с верхним образцом в виде ролика или бруска, 7- нижний образец в виде кольца, 8-силоизмерительный датчик, 9 - прибор, регистрирующий нормальную нагрузку на узел трения, 10 - прибор, регистрирующий силу трения между трущимися образцами.

Таблица 1. Результаты испытаний противозадирных, антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов

с использованием модернизированной машины трения

Смазочный материал	Нагрузка схватывания (при остановке вращения вала с кольцом), N, Н	Сила трения при нагрузке заедания, F <sub>тр</sub> , Н	Коэффициент трения $f = \frac{F_{тр}}{N}$	Площадь пятна износа на образце ролик, мм <sup>2</sup>
И-20А	720	120	0,170	15,2
Росойл-МР-7	1950	50	0,026	1,72
Росойл-ШОК	2240	30	0,013	1,23
Росойл-167	4650	30	0,006	1,48

Результаты испытаний на модернизированной машине трения показывают существенное отличие в противозадирных, антифрикционных и противоизносных свойствах смазочных материалов в зависимости от наличия и содержания в последних противозадирных, антифрикционных и противоизносных присадок.

В результате проведенной модернизации машины трения Райхерта, стало возможным определять противозадирные и антифрикционные свойства смазочных и конструкционных материалов, а также оценивать величину коэффициента трения.

[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] Шаповалов В.В., Сладковски А., Эрменов А.Ч. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2015. №. 1(658). С. 64-75.

[3] Шолом, В. Ю., Жернаков В.С, Абрамов А.Н. Методология исследований триботехнических характеристик и выбора смазочных материалов для процессов холодной обработки металлов давлением. *Кузнечно - штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* -2016. № 4. С. 10 -15.

## Экспериментальное исследование влияния импульсов тока на фреттинг-износ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*Албагачиев А.Ю. д.т.н., проф., Михеев А.В., Тананов М.А.*

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

**Ключевые слова.** Электропластичность, электрический ток, импульс, нагрузка, трение, фреттинг износ.

При фреттинге процесс трения осуществляется при циклическом микроперемещении контактирующих поверхностей качением/скольжением без смазки при малых амплитудах. Продукты износа не выносятся из зоны трения [1]. Под действием электрического тока высокой плотности механические свойства металлов изменяются временно или постоянно. При высоких плотностях тока на процесс трения оказывает влияние электропластический эффект [2].

Для изучения влияния импульсов тока на фреттинг-износ был разработан стенд, приведенный на рисунке 1, конструкция сделана на основе стенда представленного в [3].

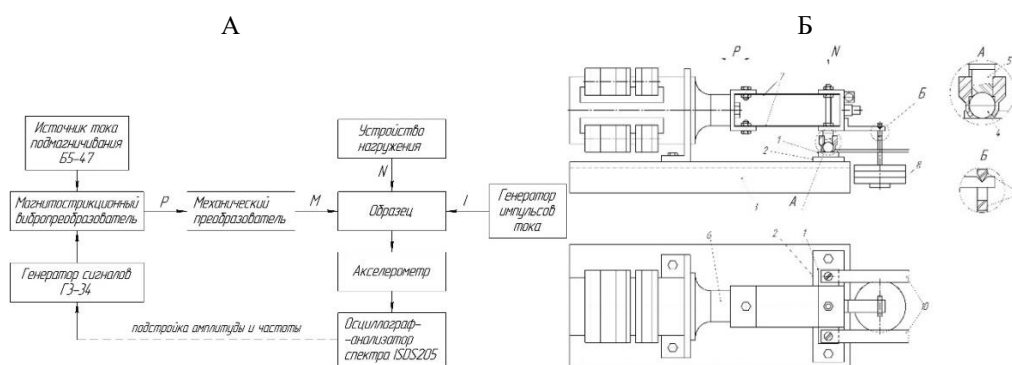


Рис. 1. Стенд для испытаний на фреттинг износ с током. А – структурная схема, Б – конструкция. Обозначения: 1- образец, 2- диэлектрическая подложка, 3- основание, 4- индентор, 5- держатель индентора, 6- магнестрикционный преобразователь,

7- подвеска индентора, 8- грузы, 9- подвеска грузов, 10- токоведущие шины.

Узел трения стенда состоит из контактирующих плоского образца и шара. Шару сообщается поступательное колебательное перемещение, а также, на него действует нормальная к поверхности образца сила нагружения. Механические колебания генерируются магнестрикционным преобразователем.

Эксперименты проводились с титановыми сплавами ВТ6 и Grade 4. Условия испытаний: плотность тока 12А/мм<sup>2</sup>, длительность импульса 100 мкс, скважность 100, температура образца 45°С, нагрузка на индентор 60 Н, время испытаний 30 мин., частота механических колебаний индентора 12 кГц, амплитуда колебаний 60мкм. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты испытаний титановых сплавов

Материал	Твёрдость НВ, МПа	Режим	Износ, мкм
Grade 4	313	С током	200x120x2,5
		Без тока	130x60x1,5
ВТ6	386	С током	170x80x3
		Без тока	150x60x2

После проведения испытания определяют степень износа образца через площадь пятен износа на плоском образце, диаметр которых измеряется при помощи инструментального микроскопа. Площадь поверхности износа вычисляется по фотографии, сделанной через микроскоп. Глубина пятен износа измерялась при помощи микроинтерферометра МИИ-4 по глубине фокусировки.

По результатам испытаний можно заключить, что воздействие импульсного тока приводит к увеличению износа при фреттинге.

[1]. Спицын В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.

[2]. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 276 с

[3]. Пахомов М. А., Михеев А. В., Тананов М. А. Методические особенности испытаний УМЗ титана в условиях фреттинг износа // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: Научные труды VII Международной научной конференции, М. ИМАШ РАН, 2021. – С. 187-188.



## Численное моделирование температуры смазочного слоя

Албагачиев А.Ю., Тохметова А.

Институт машиноведения А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
aygerim.tokhmetova@mail.ru

Качество смазочного материала при трибоконтакте зависит от градиента температуры смазочного слоя.

Экспериментальное измерение градиента температуры в смазочном слое сложная задача. Поэтому для определения градиента температуры в данной статье разработаны математические модели [1 – 3].

Рассмотрим задачу на основе одномерного уравнения теплопроводности с применением численного метода решений. Пусть температура в направлении  $Ox$  считается постоянной, при допущении, что теплофизические характеристики не зависят от температуры (рис. 1).

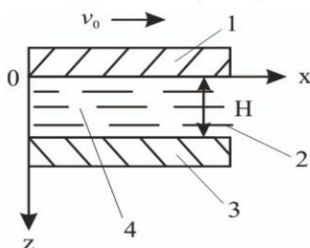


Рис.1. Модель задачи: 1 – подвижная поверхность, 2 – зазор, 3 – неподвижная поверхность, 4 – смазочный материал  
Дифференциальное уравнение гиперболического типа примет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (a = \text{const} > 0). \quad (1)$$

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} t = 0: \theta(z, 0) &= 0, 0 > z > H; \\ z = 0: -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \alpha \tau v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right), t > 0; \\ z = H: \theta(\infty, t) &= 2\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент распределения теплоты между смазкой и вращающейся со скоростью  $v_0$  поверхности.

Для численного решения задачи разобьем смазку по толщине на  $N - 1$  равных промежутков, т.е. построим конечно-разностную сетку (рис. 2):

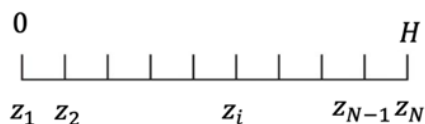


Рис.2. Конечно-разностная сетка:

$z_2, z_3, \dots, z_{N-1}$  – координаты внутренних узлов;  $z_1, z_N$  – координаты граничных узлов

Далее заменим дифференциальные операторы в (1) на их конечно – разностные аналоги. Будем пользоваться неявной схемой:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n + \theta_i^{n-1}}{\tau^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2}. \quad (4)$$

В результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\rho^2 c^2 \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n + \theta_i^{n-1}}{\tau^2} = \lambda^2 \left( \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right), \quad i = 2, \dots, N - 1, \quad n \geq 0, \quad (5)$$

Численное решение уравнения гиперболического типа (1) с начальными и граничными условиями (2) получили методом прогонки. Была разработана программа на языке программирования Python. Разница между экспериментальными и численным решениями составляет 4%. Совпадение этих двух решений позволяет говорить о достоверности результатов полученных численным и аналитическим методами.

[1]. Прогноз термоокислительных свойств смазочного масла с использованием методов машинного обучения / В. Г. Шрам, Е. Д. Агафонов, А. В. Лысянников, Н. Н. Лысянникова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 576-581.

[2]. Тохметова, А. Сравнительный анализ численного метода и методов машинного обучения задачи определения температуры легированного смазочного слоя с экспериментальными данными / А. Тохметова, А. Ю. Албагачиев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 5. – С. 96-102.

[3]. Определение температуры нагрева смазочного слоя при трении / А. Ю. Албагачиев, А. Н. Михеев, М. А. Тананов, А. Б. Тохметова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 5. – С. 93-98.

## Трибологические свойства фторопласта в среде гидравлической жидкости АМГ-10

Алисин В.В.

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

**Цель** работы состоит в определении трибологических характеристик фторопласта при скольжении по стали в среде гидравлической жидкости и определении эффективности радиационной упрочняющей обработки для повышения износостойкости пары трения.

Характеристики механических свойств фторопласта определялись методом кинетического индентирования на микротвердомере MNT Z AE 000 фирмы CSM Instruments (Швейцария) в соответствии со стандартом ISO/DIS 14577\_1:2002. В экспериментах использована алмазная четырехгранная пирамида Виккерса. Прибор относится к классу приборов для определения микромеханических свойств (микротвердости, упругих и пластических характеристик поверхности и т.д.) материалов и покрытий методом вдавливания индентора в испытываемую поверхность. Выходные параметры результатов испытания отображаются в форме первичных кинетических диаграмм внедрения в координатах сила (F)-глубина отпечатка (h).

Для достижения поставленной цели необходимо моделировать условия работы цилиндро-поршневой группы аксиально поршневого насоса по нагрузочно-скоростным параметрам в среде гидравлической жидкости. Была модернизирована машина трения МАСТ-1. Выполненная модернизация машины трения включала разработку нового узла трения, установки более мощного электродвигателя, качественно новую систему регистрации момента трения и числа оборотов вала. Реализована схема трения вращения торца кольцевого образца по плоскости. Образцы уплотнительного материала изготовлены из фторопласта Ф-4 (ГОСТ 10007-80) и радиационно-модифицированного фторопласта Ф-4РМ, полученного путем терморadiационной обработки фторопласта ионизирующим гамма-излучением. Контртело сталь 40Х13. Образцы фторопласта выполнены в виде дисков, образцы стали в виде полого цилиндра. В качестве рабочей жидкости выбрана гидравлическая жидкость АМГ-10.

**Результаты.** Для изучения влияния гидравлической жидкости на антифрикционные свойства радиационно упрочненного фторопласта при трении по стали проведены эксперименты в расширенных интервалах нагрузок и скоростей. На рис. 5 приведены результаты испытаний.

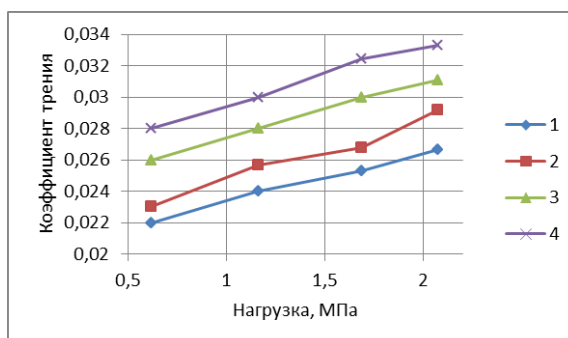


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения фторопласта Ф4М от нагрузки в среде АМГ-10 при скорости, м/с: 1 – 1.91; 2 – 2.20; 3 – 2.50; 4 – 2.93.

Увеличение нагрузки в условиях постоянной скорости скольжения приводит к росту коэффициента трения на всех режимах испытаний. Увеличение скорости скольжения в условиях постоянной нагрузки приводит к увеличению коэффициента трения. Такое поведение пары трения характерно для гидродинамического трения. Увеличение коэффициента трения объясняется тем, что с ростом скорости увеличивается лобовое сопротивление движения образца в жидкости.

Испытания на износ проведены в тоже в режиме сухого трения при скорости 2.5 м/с. Величина износа определялась весовым способом с последующим пересчетом на линейную интенсивность изнашивания ( $\Phi_4=1.07E-07$ ,  $\Phi_4М=2.78E-08$ ).

Установлено, что в условиях испытаний радиационно упрочненный фторопласт обладает большей износостойкостью, чем неупрочненный в 3,8 раза.

**Выводы.** Выполненные сравнительные испытания образцов фторопласта показали, что гамма-облучение образцов, облученных выше точки плавления, влияет на механические свойства фторопласта, примерно в 2 раза увеличивая твердость, повышая модуль упругости, возрастанию доли упругих деформаций на контакте, увеличивая стойкость фторопласта к воздействию температуры

Радиационная модификация фторопласта улучшает антифрикционные свойства уплотнений штоков гидроцилиндров и плунжеров поршневых гидронасосов. Замена фторопластовых материалов на радиационно модифицированные перспективно для повышения ресурса работы гидроцилиндров и поршневых гидронасосов.

## **Использование изменений кислотно-щелочных характеристик при оценке сроков работоспособности моторных масел в двигателях внутреннего сгорания автомобилей**

*<sup>1</sup>Бакулина В.Д.\*., <sup>1, 2</sup>Корнеев С.В.*

*\*ver-bakulina81@mail.ru*

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия;

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

Одним из путей обеспечения долговременной и бесперебойной работы двигателей внутреннего сгорания автомобилей является контроль качества используемых смазочных материалов [1]. При эксплуатации техники с дизельными двигателями возможно попадание топлива в моторное масло, что приводит к изменению физико-химических характеристик масла и, как следствие, негативному влиянию на детали двигателя [2 – 4].

Целью работы является установление предельной концентрации дизельного топлива, приводящей к браковочным показателям изменений кислотно-щелочных характеристик моторного масла.

В ходе работы были решены следующие задачи:

- проведено высокотемпературное окисление образцов моторных масел, разбавленных установленными концентрациями дизельного топлива;
- определены показатели кислотного и щелочного чисел исследуемых образцов моторных масел;
- по результатам лабораторных исследований рассчитаны предельные концентрации дизельного топлива, приводящие к критическим изменениям моторных масел различной базы.

В результате исследования получены зависимости изменений кислотно-щелочных характеристик моторных масел от концентрации, попадающего в них при эксплуатации, дизельного топлива.

После определения критериев предельного состояния моторных масел, согласно которым осуществляется выбраковка, были рассчитаны концентрации дизельного топлива, приводящие к потере работоспособности моторного масла. Основные браковочные показатели для кислотно-щелочных характеристик: превышение показателя кислотного числа по отношению к щелочному;

Установлено, что соотношение кислотного и щелочного чисел в сторону увеличения кислотного происходит: в синтетических моторных маслах при загрязнении 12,6% дизельного топлива; в полусинтетических – 1,8%; в минеральных – 1,72%.

В дальнейшем результаты исследования будут использованы для оценки сроков работоспособности моторных масел и их влияние на накопление продуктов износа в двигателях внутреннего сгорания автомобилей.

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

[2] 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. Пермяков // 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.

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

[4] Бакулина, В.Д. Алгоритм выбора моторных масел для техники. / В.Д. Бакулина, С. В.Корнеев, С.В. Пашукевич, Н. Ю. Мачехин, Буравкин, А.А. Аноприенко // Автомобильная промышленность. – 2019. – № 7. – С. 22- 25. . (К1)

## Анализ влияния состава шихты с добавками nano карбидов тантала на триботехнические свойства покрытий

*Бирюков В.П.*

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

Целью работы является установление влияния режимов лазерной наплавки многокомпонентной шихты с различной металлической основой, и добавками nano частиц карбидов тантала (TaC) на геометрические параметры наплавленных зон и триботехнические свойства покрытий.

По имеющимся оценкам износ шеек валов турбин для газоперекачивающего оборудования составил 80 % от допустимого значения и вопрос о продлении ресурса работы этих агрегатов является актуальным для современного машиностроительного производства. Одной из перспективных технологий в данном случае является лазерная наплавка [1]. К быстроизнашивающимся деталям относят и лопатки турбин газоперекачивающих агрегатов (ГПА), особенно это касается турбогенераторов. Клапаны и насосы на атомных станциях работают в особо агрессивной среде с высоким потоком нейтронов, высокими контактными нагрузками и в перегретой среде до 300°C. Использование при лазерной наплавке [2] сплавов на основе кобальта и железа позволило получить покрытия с приемлемыми результатами по износостойкости при нормальной и повышенной температуре. Механизм износа представлял собой комбинацию адгезионного и окислительного износа, но между этими двумя сплавами были обнаружены существенные различия. В случае сплава на железной основе оксид механически смешивался с сильно деформированным поверхностным металлом. Напротив, оксид на кобальтовом сплаве был отделен от поверхности без какого-либо механического перемешивания.

В наших исследованиях по лазерной наплавке покрытий использовалась многокомпонентная шихта с содержанием порошков на железной основе Fe-Cr-Co-Mo и кобальтовой основе Co-Si-Cr-Mn-Ni-W в соотношении 2:1 соответственно с добавлением в качестве упрочняющей фазы nano порошка карбида тантала (TaC) 3 и 6 об% с размерами частиц 16-40 нм. В качестве подложки использовали образцы сталей 38ХНЗМА, 15Х11МФ применяемые для изготовления валов и лопаток паровых турбин соответственно. Использование поперечных колебаний лазерного луча позволило повысить производительность лазерной наплавки в 1,4- 1,9 раза в сравнении с обработкой дефокусированным лучом. Введение в состав шихты добавок нанопорошков TaC привело к уменьшению размеров зерна в 1,5-2,0 раза по сравнению с наплавленными покрытиями без карбидов. Микротвердость наплавленных покрытий повышалась с увеличением упрочняющей фазы. На рис. 1 представлены зависимости нагрузки заедания от скорости скольжения.

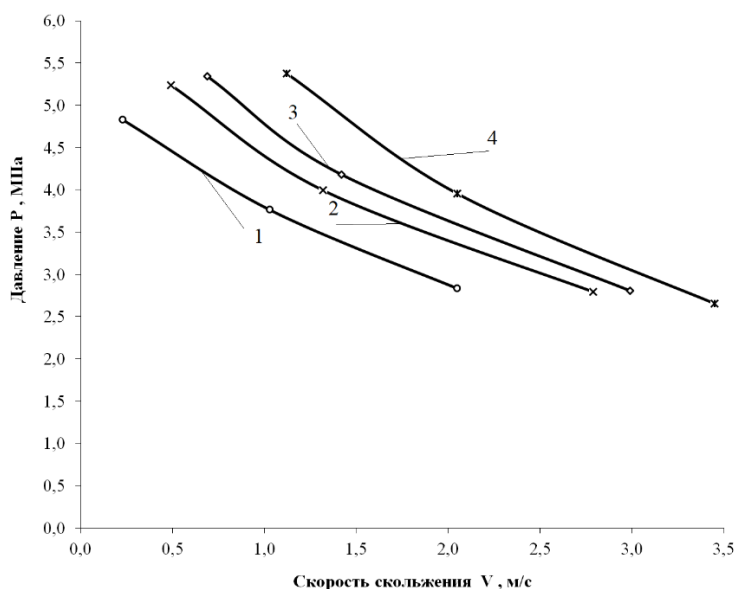


Рис. 1. Зависимость нагрузки заедания от скорости скольжения: 1- сталь 38ХНЗМА, 2- Fe-Cr-Co-Mo+ Co-Si-Cr-Mn-Ni-W, 3 - Fe-Cr-Co-Mo+ Co-Si-Cr-Mn-Ni-W+3%TaC, 4 - Fe-Cr-Co-Mo+ Co-Si-Cr-Mn-Ni-W+6%TaC

Результаты триботехнических испытаний показали значительное повышение износостойкости и задиростойкости покрытий при введении 6%TaC в состав наплавленной шихты.

[1]. Бирюков В.П., Лаптева В.Г., Хренникова И.А., Татаркин Д.Ю. Восстановление лазерной наплавкой работоспособности пары трения вал - вкладыш подшипника скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин 2013. №5. С.91- 95.

[2]. Lago P. R., Nutter J., Qi J., Stewart D., Rainforth W.M. Characterisation of the wear and friction behaviour of laser deposited cobalt and iron-based hardfacing alloys for nuclear applications //Wear. 2023. 524-525. 204829.

## Расчет износа керамической детали алмазным инструментом

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков

Тверской государственной технической университет  
vrvkv@yandex.ru

Одна из современных тенденций проектирования шлифовально-абразивного инструмента в мире состоит в увеличении применения алмазосодержащих материалов с керамическими матрицами [1, 2].

Нами разработана технология получения нового композиционного материала, представляющего собой тугоплавкую керамическую матрицу из оксида алюминия, в которую внедрены частицы алмаза. Использование алмазов крупных фракций (зернистостью выше 28/20 мкм) позволяет сформировать минералокерамический материал с высокими абразивными свойствами, который успешно применяется для изготовления режущего инструмента. Испытания показали преимущество минералокерамического материала перед традиционными алмазосодержащими материалами при обработке высокотвердой керамики. Построение математической модели износа пары трения минералокерамический абразивный инструмент – керамическое контртело позволит более рационально подойти к применению нового материала, и в частности, синтезировать его с заранее заданным комплексом эксплуатационных параметров.

Целью работы является разработка модели износа пары трения алмазосодержащий керамический абразивный инструмент – керамическая обрабатываемая деталь, позволяющей рассчитать производительность шлифования нового инструментального материала.

По результатам анализа исследований других авторов и оценке морфологии контактирующих поверхностей принято, что контакт микронеровностей на поверхностях трения абразивных алмазосодержащих керамических инструментов носит линейно-упругий характер. Модель построена в рамках основного уравнения изнашивания. Поверхность композиционного материала моделировалась набором сферических сегментов одинакового радиуса, зерна алмаза распределены в материале с заданной объемной плотностью. Использовано понятие эквивалентной поверхности, вершины микронеровностей, которой распределены по степенному закону. Теоретически получена связь между микро- и макрохарактеристиками процесса изнашивания композиционной керамической пары трения, получено уравнение для расчета производительности шлифования:

$$Q_t = \frac{Svt_m R_p}{2(v+1)n} \left[ \frac{1,5\pi q_a I_s}{t_m v(v-1)K_3} \left( \frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{\frac{v+1}{v+0,5}} \cdot \frac{I_k}{I_e}$$

Здесь  $S$  - ширина зоны износа,  $v$  - скорость взаимного перемещения инструмента и детали;  $n$  - число циклов, приводящих к отделению частиц износа.  $v$ ,  $t_m$ ,  $K_3$ ,  $R_p$ ,  $R$  - параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей,  $q_a$  - номинальное давление в контакте,  $I_s$ ,  $I_k$ ,  $I_e$  - упругие характеристики материалов алмаза, матрицы и контробразца.

Производительность шлифования алмазосодержащим керамическим инструментом оценивались по результатам фрикционных испытаний на машине трения МТ-2, реализующей схему палец-кольцо, смазкой была техническая вода. Материал контробразца – ультрафарфор.

Установлено теоретически и подтверждено экспериментально, что производительность шлифования возрастает при увеличении скорости скольжения, приложенной нагрузки и зернистости алмаза. Данным материалам не требуется периодическая правка, так как они не подвержены засаливанию, в отличие от традиционных алмазосодержащих материалов с менее твердыми матрицами. Полученная зависимость для производительности шлифования не зависит от пути трения, что соответствует результатам фрикционных испытаний для выбранной пары материалов. Установлено, что согласно теоретическим расчетам и результатам экспериментов, производительность шлифования практически не зависит от концентрации зерен алмаза. Это обусловлено близкими механическими свойствами алмаза и корундовой матрицы. Так же, при увеличении количества контактирующих зерен алмаза, снижается нагрузка на каждое отдельное зерно, и объем сошлифованного материала меняется незначительно.

Результатами экспериментальных исследований подтверждена правомерность выбранного метода расчёта и принятых при этом допущений. Выбранная модель контактного взаимодействия позволила получить функциональные уравнения для расчета производительности шлифования абразивного алмазосодержащего керамического при различных режимах эксплуатации. Установленные зависимости могут быть использованы для достижения высокой производительности алмазного керамического инструмента.

[1]. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокompозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.

[2]. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 3. С. 59-68.

## Конструирование узлов трения космического применения

Броновец М.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Целью работы является разработка концепции создания узлов трения для космических изделий, работающих в открытом космосе.

В решении этой задачи возможны два основных подхода. Один из них – использование традиционных низкотемпературных пластичных смазочных материалов типа ВНИИНП-274, НИКА, «Север» и др. для смазывания прежде всего подшипников качения, зубчатых передач, шарниров и других подвижных сопряжений. На рис. 1 и рис.2 показаны зависимости вязкостных характеристик этих смазочных композиций от низких значений температуры.

Наиболее современная смазка «СеверАМ» используется в конструкции для смазывания узлов, работающих в контакте с агрессивными средами, при температуре от минус 90 °С до плюс 200 °С, а также в условиях глубокого вакуума. Смазка «Север-НР» предназначена для применения в зубчатых зацеплениях и подшипниках качения редукторов конструкции при температуре от минус 90 °С до плюс 165 °С, а также в узлах трения скольжения при температуре от минус 100 °С до плюс 250 °С. Однако даже на орбите Международной космической станции минусовые температуры ниже указанных пределов. Потому требуется термоизоляция узлов трения и их подогрев. Это сильно усложняет конструкции узлов трения.

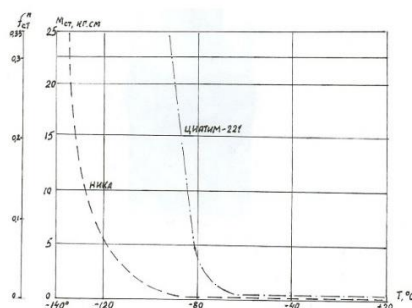


Рис. 1. Зависимость усилия сдвига подшипника от температуры для смазок НИКА и ЦИАТИМ –221

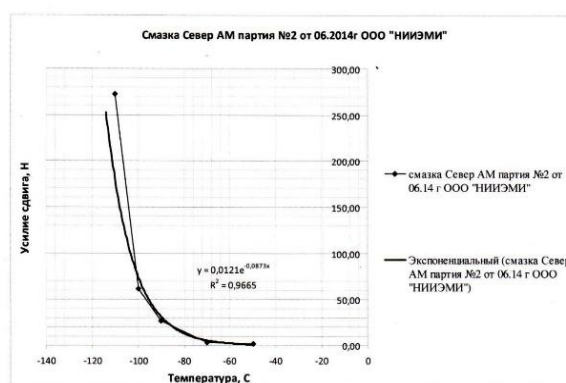


Рис. 2. Зависимость усилия сдвига от температуры для смазок «Север»

В таблице 1 приведены коэффициенты трения твёрдосмазочного покрытия ЭОНИТ-3 в зависимости от температуры. Следует обратить внимание, что коэффициент трения при плюс 150 °С и минус 150 °С сохраняет тоже невысокое значение 0,05-0,08. Отсюда следует, что применение твёрдосмазочных покрытий для узлов трения, работающих в открытом космосе является предпочтительным [1].

Таблица 1. Коэффициенты трения твёрдосмазочного покрытия ЭОНИТ-3 в зависимости от температуры

Марка ТСП	Воздух, температура 20 °С		Вакуум 1·10 <sup>-5</sup> мм рт. ст.			Продолжительность испытаний [час]
	Коэффициент трения		Температура [°С]	Коэффициент трения		
	f <sub>нач</sub>	f <sub>уст</sub>		f <sub>нач</sub>	f <sub>уст</sub>	
ЭОНИТ-3	0,21	0,12...0,14	20	0,15	0,07...0,08	237
			150	0,12	0,05...0,07	40
			- 150	0,17	0,06...0,08	10

[1].Броновец М.А. Триботехнические характеристики твёрдых смазочных покрытий, Международный научный журнал «Трение и износ», №4, том 44, 2023 г., с.335-341.

## **Международная научная конференция «TRIBOINDIA -2023»**

*Броновец М.А., Яковенко А.А.*

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Международная научная конференция «ТРИБОИНДИЯ» проводится ежегодно и является наиболее крупным научным форумом в области трибологии в Индии. Она проводится под эгидой Индийского трибологического общества и научных трибологических центров Индии по месту проведения конференции. Конференция «TribIndia -2023» проводилась 5-7 октября, NIT Srinagar, J&K, India.

Конференция проходила в Центре научных конференций Университета провинции Шринагар. Она включала пленарные заседания и секционные заседания. Секционные заседания проходили в залах Дункана Даусона, Леонардо да Винчи и Кулона.

От России пленарные доклады были представлены И.Г. Горячевой и М.А. Броновцом.

Приглашённый доклад был сделан А.А. Яковенко. Кроме того, М.А. Броновцом были сделаны 2 секционных доклада.

М.А. Броновец и А.А. Яковенко были председателями секционных заседаний.

Помимо представителей России, пленарный доклад был сделан учёным из Японии Kazuyuki Yagi.

На конференции была делегация учёных Узбекистана во главе с Джумабаевым.

В работе конференции принимало участие большое количество учёных из Научных центров и Университетов Индии. Конференция была хорошо организована, уровень работ, представленных на конференции, был высоким, охватывал большую часть научных направлений в области трибологии и смежных наук. Работы, как правило, выполнялись на современном научном оборудовании и на высоком научном уровне. Докладчики хорошо владеют английским языком, т.к. английский является вторым государственным языком Индии. Конференция проходила с соблюдением индийских обрядов.

В рамках конференции была организована выставка научных приборов и оборудования, предназначенных для выполнения работ в области трибологии. Они были представлены в основном представительствами американских компаний.

Отношение к россиянам доброжелательное и на конференции, и при встречах на улице.

## Критерий дроздова как оценка защитной способности пластичных смазок

<sup>1</sup>Буяновский И.А. \*, <sup>1</sup>Стрельникова С.С., <sup>1</sup>Самусенко В.Д., <sup>2</sup>Татур И.Р., <sup>2</sup>Кальянова О.В.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*buyan37@mail.ru

<sup>2</sup>Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия.

Данное исследование проводится применительно к пластичным смазочным материалам на основе сульфонатных загустителей, которые являются перспективной заменой загустителей на основе литиевых мыл [1].

**Основная идея работы** – поскольку к важнейшим свойствам пластичных смазок относятся их противоизносные свойства, т.е. их способность обеспечивать материалам трущихся тел защиту от износа, и их защитные свойства, т.е. способность защищать смазываемые поверхности металла от повреждения вследствие коррозии, причём защита как от износа, так и от коррозии обеспечивается образующимися на поверхности металла модифицированными слоями, образуемыми исследуемыми пластичными смазками на защищаемых поверхностях, то из этого следует, что в обоих случаях эффективность смазок зависит от прочности этих слоёв, хотя механизмы их образования и разрушения различны.

**Цель работы** – установить характер изменения температурно-энергетического критерия Ю.Н. Дроздова, и скорости разрушения тонких защитных слоёв пластичных смазок под действием коррозионно-активных сред при переходе от одной исследуемой смазки к другой.

**Анализ.** Для описания трибологического поведения узлов трения, работающих в режиме граничной смазки применён безразмерный температурно-энергетический критерий Дроздова  $\pi_D = RT/E_p$ , который был использован [2] для расчёта интенсивности изнашивания трущихся тел в химически активных средах. Здесь  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура,  $E_p$  – энергия активации разрушения химически модифицированного слоя (оценка её значения проводится в соответствии с методикой [3]). Скорость коррозии стальных образцов оценивается на универсальном автоматическом коррозиметре «Эксперт-004». Идея исследования состояла в оценке значений критериев Дроздова  $\pi_D$  и скоростей  $V$  коррозии для ряда смазок и установлении тенденций их изменения по мере перехода от одной смазки к другой. Испытанию подверглись 6 сульфонатных смазок, синтезированных по методике [4]. Результаты экспериментов представлены на рис. 1.

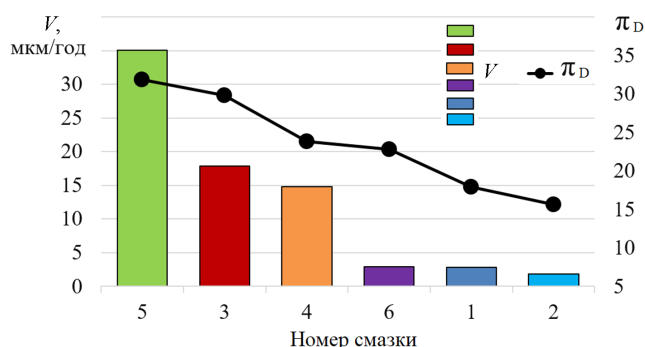


Рис. 1. Скорость коррозии стали  $V$  при разрушении коррозионно-активной средой защитных слоёв исследуемых сульфонатных смазок (гистограмма) и значения температурно-энергетического критерия  $\pi_D$  изнашивания модифицированных слоёв трибохимического происхождения

Таким образом, сопоставление значений критерия  $\pi_D$  и скорости  $V$  коррозии стали, характеризующей скорость разрушения защитного слоя, показало, что невзирая на разницу методов получения сравниваемых характеристик динамика изменений их значений от одной смазки к другой одинакова, т.е. происходит симбатно. Следовательно, для исследуемых сульфонатных смазок имеет место качественная корреляция между значениями критерия  $\pi_D$  с величинами скоростей коррозии стали в коррозионно-активной среде под плёнками сульфонатных смазок, что свидетельствует о том, что если ранжировать сульфонатные смазки по одному показателю (например, по величинам энергии активации), то отпадает необходимость ранжировать их по другому показателю (то есть по защитным свойствам) – они будут расставлены в том же порядке.

[1] Гришин Н.Н. Пластичные смазочные материалы. В кн.: Трибология. Состояние и перспективы. В 4-х т. Т.2. Смазка и смазочные материалы. Уфа, РИК УГАТУ, 2019. – С. 335–358.

[2] Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учётом механических, физико-химических и геометрических факторов. // Современная трибология. Итоги и перспективы. М.: ЛКИ, 2008. – С. 24-32.

[3] Буяновский И.А. Оценка кинетических характеристик трибохимических процессов при граничной смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006, № 12, 22-26

[4] Анисимова А.А. Исследование влияния добавок на свойства сульфонатных пластичных смазок: дис. канд. техн. наук: РГУ им. И.М. Губкина. – М., 2018.



## Фрэнк Филип Боуден и его контакты с трибологами РАН

*Буяновский И.А. \*, Щербаков Ю.И.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
buyan37@mail.ru

Один из крупнейших трибологов XX века, внёсший весомый вклад в развитие фундаментальных основ трибологии, Фрэнк Филип Боуден (1903–1968 гг.) стал легендой для трибологов всего мира ещё при жизни. Он был автором (совместно с Д. Тейбором) знаменитой монографии “Friction and Lubrication of Solids”, которая стала энциклопедией трибологии своего времени. Не случайно известный американский триболог К.С. Лудема писал, что для широкой аудитории имена Боуден и Тейбор стали синонимом словам «трение и износ». Его многочисленные исследования в области трибологии обессмертили его имя [1, 2]. До сих пор серьёзные публикации в области трибологии не обходятся без ссылок на его работы [2-4].

В текущем году исполняется 120 лет со дня рождения этого великого триболога. Коротко напоминаем читателям основные даты и события его жизни. Фрэнк Филип Боуден родился 2 мая 1903 г. в городе Хобарте на острове Тасмания (Австралия). Высшее образование получил в Университете Тасмании, который окончил в 1926 г., получив стипендию для стажировки в Кембриджском университете, и в 1927 г. был зачислен туда в качестве студента-исследователя, где заинтересовался трибологией и, начиная с 1931 г., опубликовал ряд пионерских работ в этом направлении. В 1933 г. в Кембридже ему была присвоена степень PhD, в 1938 – степень D.Sc. В 1937 г. Боуден, не оставляя активной исследовательской деятельности в Кембридже, организует и возглавляет отдел исследования смазки и износа в известной британской фирме «Шелл», а также консультирует некоторые другие фирмы. Во время Второй мировой войны он из патриотических побуждений возвращается в Австралию, где в 1939-1945 гг. возглавляет отдел «Смазки и подшипники» Руководящего совета по научным и промышленным исследованиям Содружества, выполняя ряд актуальных работ оборонного характера и успевая при этом развивать свои собственные исследования. В 1946 г. Ф.Ф. Боуден вернулся в Кембридж, где возглавил вновь созданную лабораторию по физической химии трущихся тел, в работе которой органично сочетаются фундаментальные исследования и решение актуальных практических задач. В 1948 г. его выбирают действительным членом Лондонского Королевского общества, а позднее выходит в свет его упомянутая выше книга в двух томах, перевод которых на русский язык в 1960 и в 1968 гг. был осуществлён под редакцией самого И.В. Крагельского. В 1957 г. он становится профессором физики поверхности, а его лаборатория входит в состав знаменитой Кавендишской лаборатории, где Боуден продолжает свои исследования в области трибологии, сочетая их с консультациями, даваемыми многочисленным фирмам, и работой в различных правительственных комитетах и комиссиях.



В эти годы он посещает Москву, где встречается с известными советскими трибологами – акад. Б.В. Дерягиным, проф. М.М. Хрущовым, проф. А.С. Ахматовым и др. На фотографии он запечатлён во время визита в лабораторию Б.В. Дерягина в Институте Физхимии РАН. Б.В. Дерягин (слева) показывает английскому гостю оборудование, на котором он проводил свои знаменитые эксперименты по измерению адгезии твёрдых тел. Следует также отметить, что проф. А.П. Семёнов (ИМАШ РАН) неоднократно встречался с Ф.Ф. Боуденом во время своей стажировки в Англии и обсуждал с ним спорные проблемы механизма схватывания металлов при трении.

Скончался Ф.Ф. Боуден 3 сентября 1968 г. Его любимый ученик Д. Тейбор так написал о своём покойном друге и учителе: «Боуден был человеком многих талантов и мог бы оставить свой след в истории как писатель, как преподаватель, как эстет, как политик и государственный деятель, как администратор, как деловой человек, как учёный. В определённом смысле он действительно был всеми ими, но его самым глубоким и самым устойчивым интересом, прошедшим через всю его жизнь, была его лаборатория, его признание и одержимость научными исследованиями. Он был истинным учёным-экспериментатором величайшей оригинальности, целеустремлённости и многогранности» [1].

В заключение отметим, что перечень работ Боудена впечатляет. Адгезия трущихся поверхностей, механизм трения твёрдых тел, износ и повреждение поверхностей, разрушение окисных плёнок и трение ювенильных поверхностей, адгезионно-деформационная теория трения, механизм трения конька по льду и лыжи по снегу, исследование природы поверхности твёрдого тела, площадь фактического контакта и расчёт температуры на этой площади контакта, измерение температур «горячих точек», образующихся при трении металлов, составляющих естественную термопару, трение неметаллов, использование политетрафторэтилена как материала для скользящих тел, механизм трения при граничной смазке, включая знаменитую «химическую» теорию трения при этом режиме, а также влияние температуры на трение при граничной смазке и многие другие исследования и разработки.

[1] Tabor D. Frank Philip Bowden: Biographical Memories of Fellow of the Royal Society, 1969, vol. 15. - P. 1-38.

[2] Dowson D. History of Tribology. London – N.Y.: Longman, 1978. – 677 с.

[3] Фролов К.В. (ред.) Современная трибология: итоги и перспективы. – М.: ЛКИ, 2008. – 480 с.

[4] Буяновский И.А. и др. Граничная смазка: этапы развития трибологии. – М.: Нефть и газ, 2002. – 230 с.

## Поведение при трении композиционных материалов на основе традиционных антифрикционных сплавов АО20-1 И Б83

Быков П.А., Калашников И.Е.

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН.

pbykov@imet.ac.ru

Традиционные антифрикционные сплавы на основе олова, свинца и алюминия широко представлены в качестве материалов для подшипников скольжения. Несущая способность существующих трибологических сплавов ограничивает проектирование новых узлов трения, отвечающих растущим требованиям экономичности, качества и эффективности. Встает вопрос о создании новых материалов с более широким диапазоном условий трибонагружения. Так, одно из перспективных направлений в разработке новых антифрикционных материалов – создание на основе известных сплавов композиционных материалов (КМ) с прогнозируемым уровнем свойств [1].

Цель настоящей работы: исследовать трибологические характеристики и поведение образцов КМ на основе известных антифрикционных сплавов Б83 и АО20-1 против контртела из стали при различных условиях нагружения, определить условия изменения режимов трения.

Порошковая металлургия и литейные технологии являются наиболее распространенными методами создания новых КМ [2,3]. Так, КМ на основе Б83 получали горячим прессованием порошковой смеси с введенными упрочняющими частицами  $Ti_2NbAl$  (ex-situ). Для создания КМ на основе АО20-1 применяли метод реакционного литья (in-situ) для формирования армирующей фазы  $Al_3Ti$ . При трибологических испытаниях исследовали образцы с разным количеством наполнителя и неармированные образцы для сравнения.

Структурные исследования образцов КМ на основе Б83 после горячего прессования показали качественное распределение армирующей фазы внутри объема. Упрочняющие частицы сохраняют свою округлую геометрическую форму и равномерно распределяются на поверхности. Отмечено положительное влияние горячего прессования на интенсивность изнашивания материала, по сравнению с образцом в состоянии поставки. Введение армирующих добавок интерметаллида  $Ti_2NbAl$  существенно снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания образцов КМ. В то же время, количество армирующей фазы влияет на стабильность процесса трения, что можно связать с выкрашиванием частиц интерметаллида вследствие накопления дефектов на границе наполнитель/матрица во время испытания. Изучение поверхности образцов КМ и продуктов изнашивания позволило выявить преобладающие режимы и механизмы изнашивания в процессе трения [4]. Армирование интерметаллидными частицами  $Ti_2NbAl$  позволяет избежать процессов деформации поверхностных слоев, сохранить умеренный режим изнашивания при увеличении удельных нагрузок.

Исследования структуры КМ на основе АО20-1 показали, что метод механического замешивания дискретных реакционноактивных добавок титанового порошка позволяет его ввести, равномерно распределить и сформировать упрочняющие интерметаллидные фазы в объеме закристаллизовавшихся КМ. Увеличение объема вводимого порошка титана обеспечивает увеличение количества образующихся интерметаллидов. По сравнению с матричным сплавом образцы КМ демонстрировали более высокие показатели износостойкости. Равномерность распределения армирующей фазы в матрице защищает поверхность трения, уменьшая площадь участков, склонных к схватыванию. Лучшие показатели наблюдали у образцов с более дисперсной структурой и с наиболее равномерным распределением армирующей фазы. Коэффициент трения образцов КМ на этапе приработки был выше, чем у матричного сплава. Дальнейшее увеличение нагрузки показало заметное снижение коэффициента трения образцов КМ по сравнению с исходным материалом.

Для образца КМ с содержанием 3 масс.%, показавшим лучшие трибологические характеристики, были разработаны карты трения при различных наборах скоростей и нагрузок. Испытания позволили показать влияние скорости и нагрузки на интенсивность изнашивания, коэффициент трения и нагрев материала. На основе этих данных определены четыре режима изнашивания и их границы, которые позволят прогнозировать поведение КМ в узлах трения.

В работе показано, что применение методов порошковой металлургии и литейных технологий позволяет создавать новые КМ на основе существующих антифрикционных материалов. Полученные КМ обладают улучшенными трибологическими свойствами по сравнению с исходными материалами. Изучение режимов и механизмов изнашивания позволяет прогнозировать поведение новых КМ при различных условиях трибонагружения.

[1]. Dipen Kumar Rajak, Durgesh D. Pagar, Ravinder Kumar, Catalin I. Pruncu. Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. No 6. P. 6354-6374.

[2]. П.А. Быков, И.Е. Калашников, Л.И. Кобелева, И.В. Катин, Р.С. Михеев. Wear modes in testing the antifricition layer of babbitt B83 // Letter of Materials. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 219-224.

[3]. П.А. Быков, И.Е. Калашников, Л.И. Кобелева, И.В. Катин, Р.С. Михеев. Картирование режимов трения композиционных материалов с интерметаллидным упрочнением на основе антифрикционного сплава системы Al-Sn-Cu // Письма о материалах. 2021. Т.11. №2. С.181-186.

[4]. G.W. Stachowiak, P. Podsiadlo. Characterization and classification of wear particles and surfaces // Wear. 2001. Vol. 249. No. 1-2. P. 194-2001.

## Исследование трибологических характеристик пластичного смазочного материала Пума

Ващишина А.П.

ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск

vashhi.anya@yandex.ru

Для исследования свойств трибосистемы гребень-рельс использовали смазочный материал Пума. Выбор соединений, используемых в качестве присадок, происходил по трем параметрам: класс соединения, агрессивность к металлу, способность к смачиваемости поверхности. Определение износа проводились на разработанной машине трения. Трибологические свойства смазочного материала определялись на маслоиспытательной машине КТ-2 при осевой нагрузке  $(110 \pm 1)$  Н. Оценка влияния исследуемых присадок на свойства гребня и рельса включала: исследование структуры поверхности, химического состава, твердости, качества поверхностного слоя, статических характеристик. Исследование диффузии химических элементов смазочного материала в детали пар трения проводилось с помощью спектрометрического анализа образцов до проведения испытаний и после их завершения. Контролировался износ гребня колеса локомотива  $h_{гр}$ , было установлено, что с присадкой фосфорорганической присадки среднее значение износа поверхности гребня колеса локомотива составляет 180 мкм., со смазочным материалом Пума – 180 мкм, с присадками гидрохинона – 170 мкм, сульфорганическая присадка – 150 мкм. По результатам исследований можно сказать, что добавление сульфосоединения к смазочному материалу Пума уменьшает скорость изнашивания на 20%, добавка производных гидрохинона на 6%. Эффективность выбранных присадок объясняется тем, что на поверхности формируются адсорбированные слои из-за полярной природы молекул. При добавлении присадок количество выделяющегося водорода значительно уменьшается, 32, 15 и 8 ppm с использованием сульфоприсадки, гидрохинона и фосфорорганического соединения соответственно. Использование сульфорганической присадки явно показывает завышенные значения динамической вязкости, что говорит о высоком коэффициенте внутреннего трения и материал становится более плотным. Значения остальных материалов имеют незначительные изменения. Увеличение вязкости приводит к загущению смазочного материала, что приведет к увеличению температуры в трибосопряжении. Низкая вязкость приведет к тому, что кислород во влажных условиях эксплуатации попадет в смазочный материал и к поверхностям трения, что приведет к коррозии

Испытания смазочного материала на ИК-спектрометре показывают, что увеличивается интенсивность полосы при частоте  $633 \text{ см}^{-1}$ , которая относится к полосе поглощения Fe-OH, по сравнению с исходным образцом, что напрямую связано с увеличением концентрации железа в отработанном смазочном материале. 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. Наибольшее выделение масла наблюдалось у смазочного материала с сульфорганической и фосфорорганической присадками. Смазки начинают заметно плавиться примерно при  $190-200 \text{ }^\circ\text{C}$ , примерно при  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  смазки плавятся полностью и переходят в жидкое состояние. После проведения трибологических испытаний на маслоиспытательной машине КТ-2 смазочного материала Пума с присадкой гидрохинона на поверхности установки образовались белые кристаллы.

Спектрометрические исследования химического состава поверхности гребня до и после испытаний сходятся с требованиями РЖД. Следует отметить, что показатели по хрому до и после испытаний резко отличаются. Данные исследования подтверждаются исследованием поверхности гребня колеса локомотива до и после испытаний методом рентгено-флуоресцентного анализа (РФА). Атомы Cr могут проникать в пространство между плоскостями серы, что предотвращает попадание влаги в покрытие. Соединения  $\text{MoS}_2$ -Cr сохраняют слоистую базовую структуру материала  $\text{MoS}_2$ , поэтому они способны образовывать стабильный передаточный слой и обеспечивают хорошие трибологические свойства благодаря объемной структуре  $\text{MoS}_2$ . Определяющее влияние на износ гребня оказывают вязкость СМ и интенсивность выделения водорода. Под воздействием трения, радиуса криволинейных участков и расположения левой и правой колесной пары межремонтный пробег локомотива различен. Использование фосфорорганической присадки предотвращает образование отложений и улучшает смазывающие свойства, а также уменьшает количество выделившегося диффузионно-активного водорода. Сульфорганическая присадка способствует наименьшему износу. Введение присадок сульфосоединения, фосфорорганического соединения, гидрохинона уменьшает значение коэффициента трения. Применение исследуемых присадок не изменяет структуру поверхностного слоя и прочностные свойства гребня бандажа и рельса. В качестве присадок в СМ предпочтительнее использование органических соединений, позволяющих уменьшать износ и выделение диффузионно-активного водорода, что позволит увеличить эксплуатационный ресурс колесных пар локомотива.

### Литература

- [1] Shalygin M. G., Vashchishina A. P. Anti-frictional lubricant additives for locomotive wheel flange //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2021. – Т. 2340. – №. 1.
- [2] Shalygin M. G., Vashchishina A. P. Mathematical Modeling of the Wear Rate of the Friction Pair of a Locomotive Wheel–Rail //Journal of Friction and Wear. – 2023. – Т. 44. – №. 1. – С. 18-22.

## Исследование трибологических свойств моторного масла и его влияние на износ и трение

Ващишин С.П.

ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск  
vashhi.anya@yandex.ru

Исследования двигателей внутреннего сгорания показали, что только 30% образуемой сажи попадает в атмосферу, остаток образует отложения на стенках цилиндра и поршне. Сажа – продукт неполного сгорания углеводородов, состоящий в основном из ацетиленов и полициклических ароматических углеводородов. Эти компоненты имеют особенное высокое кислотное и летучее. Концентрация образующихся частиц сажи увеличивается с увеличением соотношения воздух-топливо.

При разбавлении моторного масла топливом происходит снижение вязкости, деполимеризации полимерной присадки, что приведет к слишком тонкой защитной пленке. Наличие слабой защитной пленки способствует повышенному износу и заклиниванию движущихся частей при более высоких нагрузках. Актуальным является вопрос механизма смазывания, путем разбрызгивания, а также исследование влияния продуктов отработки моторного масла на компоненты двигателя.

Частицы сажи, по отдельности, достаточно твердый продукт, тогда, как, агломерации частиц имеют структуру мягче. Сажа и используемые смазочные материалы имеют различный состав и соотношение углерода и водорода, что обусловлено окислительными процессами. Помимо собственно химического старения масла, его разрушение также происходит под воздействием остатков не полностью сгоревшего топлива, конденсата или проникающих в него утечек охлаждающей жидкости, металлических частиц износа деталей двигателя, пылевых примесей, а также сажи в дизельных двигателях.

Важным условием является режим работы двигателя и пробег автомобиля. Исследование состава и размера частиц отработанного моторного масла проводится с помощью рентгено-флуоресцентного метода и просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения. Для проведения испытаний существует несколько методов старения масла: лабораторный метод, извлечение сажи из и смешивание с испытуемой смазкой, использование технического углерода для оценки уровня износа из-за загрязнения сажей.

Испытания моторного масла с различными присадками, смешанными с сажей, проводились на четырехшариковой машине трения. Результаты исследований показали увеличение износа, что связано с частицами технического углерода и сажи, которые адсорбируют противоизносные вещества внутри смазки.

Работы авторов [1,2] показали, что агломерации частиц сажи имеют высокую плотность и диаметр, намного превышающий смазывающий слой, в результате чего, контакты двигателя не смазываются. Спектральные исследования следов износа в трибопленке показали, что спектр содержит следы кальция, фосфора, серы и железа, что говорит о том, что модификаторы трения и присадка не влияют на свойства смазывающего масла. Вязкость смазки оказывает фундаментальное влияние на процесс смазки. Если смазка имеет низкую вязкость, смазка вытесняется из смазочного пространства, тем самым уменьшая смазочную пленку, что приводит к плохой смазке. Смазке с высокой вязкостью сложнее проникнуть в смазочное пространство, что приводит к недостаточной смазке. По этой причине необходимо контролировать вязкость при изучении влияния деградации и загрязнения моторного масла на смазывающую способность. Вязкость масла может меняться в зависимости от давления и температуры [3] и режимов эксплуатации. Сажа, образующаяся в двигателе, а также агломераты сажи, вызывают твердые отложения, что приводит к увеличению вязкости и загущению моторного масла. Частицы сажи являются абразивами, которые антагонистически взаимодействуют с защитными трибопленками, образуемыми противоизносными присадками, и усиливает износ деталей двигателя [4].

Результаты показали зависимость снижения вязкости от возрастающей степени деградации смазки при всех измеренных температурах, скоростях и давлениях. Необходимо отметить, что серьезное влияние на смазочные масла оказывают стандартные процедуры окисления, где кинематическая вязкость снижается до 100%.

Спектральная область в виде широкой полосы в области 3600–3150 см<sup>-1</sup>, обусловлена гидроксильной группой. Концентрацию воды определяли по интенсивности спектральной полосы при 3400 см<sup>-1</sup>. Спектральную область около 2000 см<sup>-1</sup> принимают для оценки уровня сажи в моторном масле, данная область относится к части спектра, в которых не наблюдаются колебательные движения частиц, поэтому было принято взять ее как за область колебаний частиц сажи. Сажа в моторном масле вызывает смещение базовой линии спектра из-за поглощения и рассеяния света. Спектр свежего моторного масла имеет пропускание 100% в районе 2000 см<sup>-1</sup>. По мере увеличения концентрации частиц сажи в смазке коэффициент пропускания уменьшается.

[1]. Green, D. A., Lewis, R., and Dwyer-Joyce, R. S. The wear effects and mechanisms of soot contaminated automotive lubricants. Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology. 2006. 220, p.159–169.

[2]. Sato, H., Tokuoka, N., Yamamoto, H., and Sasaki, M. Study of wear mechanism by soot contaminated in engine oil. SAE paper. 1999. №01. 3573.

[3] Macián, V.; Tormos, B.; Bastidas, S.; Pérez, T. Improved fleet operation and maintenance through the use of low viscosity engine oils: Fuel economy and oil performance. Maint. Reliab. 2020, 22, 201–211.

[4] Bagi, S.; Kamp, C.J.; Sharma, V.; Aswath, P.B. Multiscale characterization of exhaust and crankcase soot extracted from heavy-duty diesel engine and implications for DPF ash. Fuel 2020, 282, 118878.

## Новый органический смазочный материал и его трибологические характеристики

Войнов К.Н.

Инженерная академия. С-Пб, Россия.

E-mail: forstar@mail.ru

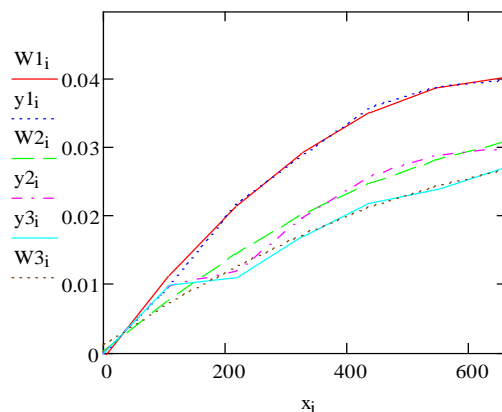
В настоящее время, когда темпы развития техногенного загрязнения окружающей среды остаются недопустимо высокими, так что её повреждения может стать необратимым, экология становится важнейшим теоретическим и прикладным направлением современной науки. Нельзя не обратить внимания, на то, что одним из значительных источников экологических проблем являются смазочные материалы [1].

**Цель работы:** установить трибологические характеристики экологически чистого смазочного материала, представляющего собой измельчённый человеческий волос.

**Материалы и методика:** в качестве органической смазки была предложена и взята на сегодняшний день самая дешёвая в мире смазка из человеческих волосков (бороды и усов), сбритых электрической бритвой (без использования каких-либо шампуней, гелей или мыл, то есть всухую). Дело в том, что такого типа волосы, как известно, содержат жир, так что иной маслянистой композиции в зону трения вводить не надо. Кроме того, волосы при их расчёсывании гребёнкой имеют свойство наэлектризовываться и даже частично «намагничиваться». Так, использование этого установленного автором весьма положительного эффекта для пар трения было подтверждено следующим опытом. Даже при вертикальном расположении пар трения или при их остукивании в вертикальном положении о преграду (о стол) нанесённая на поверхности трения новая органическая смазка, растёртая в порошок при трении практически не сваливалась с поверхности, а оставалась на ней, обладая повышенной адгезией [2].

Приводим одно из возможных конструкторских решений, позволяющее осуществить в практических условиях весьма стабильное «захватывание» смазки поверхностями трения. Рассматривается пара трения типа «пята - подпятник». Детали изготовлены в виде двух шайб, одна из которых (верхняя) имеет с одной стороны хвостовик, вставляемый в шпиндель привода механизма (например, вертикального шпинделя четырёхшариковой машины трения), а с другой – спиралевидный паз, профиль которого имеет несколько бо́льшую глубину с края шайбы и меньшую глубину (вплоть до нуля) в её центре. Результаты экспериментов обработаны математически и отражены на графике (см. Рисунок).

**Эксперимент и обсуждение.** Трибологические исследования проводили при постоянной нагрузке и частоте вращения шпинделя 1410 мин. Предварительно на нижнюю шайбу наносили измельчённый волос, в количестве достаточном для покрытия поверхности нижней шайбы слоем толщиной на 3-4 мм выше самых высоких пиков неровностей поверхности.



**Рис. 1** – Зависимости износов нижней шайбы от продолжительности испытаний  $x_i$  [мин]– верхняя кривая – без смазки, две нижние – со смазывающим порошком.

**Вывод:** таким образом, использованный в качестве органического смазочного материала растёртый в порошок человеческий волос при интенсивном его подаче обеспечивает заметное повышение износостойкости трибосопряжения. Кроме того, был проведён ещё один дополнительный тест: в течение многих месяцев стальные поверхности нескольких стальных шайб просто были покрыты новой органической смазкой. Появление коррозии на поверхностях обнаружено не было

[1]. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Любинин И.А. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект. К.:Атика-Н. – 292 с.

[2]. Войнов К.Н.(ред.) – В кн.: Трибология. Международная энциклопедия. В 12 томах. Т. 5. Масла, смазки, присадки для подвижных трибосопряжений, герметизация и уплотнения. С-Пб: АНИМА, 2021. – 378 с.

## Трибология топокомпозитов

*Воронин Н.А.*

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

voroninn@inbox.ru

Среди большого количества показателей и параметров, характеризующих любой техникой объект, лишь вполне определенные показатели выступают мерой совершенства (качества). Для узлов трения наиболее важными и, в большинстве случаев, первостепенными показателями качества являются параметры, характеризующие функциональные возможности (триботехнические характеристики и несущая способность). Триботехнические характеристики поверхностей трения (износостойкость и коэффициент трения) являются производными интегральными характеристиками удельных величин износа и сил трения, действующих на фактических пятнах контакта. Деформационно-силовые параметры последних определяются величинами эксплуатационных нагрузок, физико-механическими характеристиками материала поверхностного слоя и геометрией контактируемых тел. Направленно изменять напряженно-деформированное состояние в приповерхностном слое, деформационно-силовые параметры контактных областей и природу контактного взаимодействия, как показывает история развития техники, наиболее рационально путем нанесения покрытий и модифицирования слоя поверхности трения.

Современные машиностроительные технологии нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев позволяют изготавливать поверхностные композиции на основе металлов, керамики и полимеров, наносить практически любые твердые материалы от фторопласта до алмаза, изменять структуру и состав поверхностного слоя практически любых конструкционных и инструментальных материалов. Существующий в настоящее время набор традиционных и современных технологий позволяет получать поверхностные слои с измененной структурой и составом толщиной от нескольких миллиметров для наплавляемых покрытий до нескольких микрометров и менее для термовакуумных, ионно-плазменных и газофазных покрытий. Толщины покрытий и слоев, получаемых всеми видами существующих в технике поверхностных обработок, охватывают пять порядков значений. Если толщина покрытия (модифицированного поверхностного слоя) невелика (сравнима или меньше размеров контактной области), а соотношение физико-механических характеристик компонентов слоистой системы (основы и покрытия) таково, что внешние воздействия воспринимаются и локализуются не только в материале покрытия, но и в материале основы, то такой слоистый композиционный материал получил название топокомпозита.

Одна из главных проблем создания эффективных топокомпозитов триботехнического назначения — это выбор материалов приповерхностного слоя. Сегодня зачастую конструкторы не рассчитывают, а выбирают состав и структуру приповерхностного слоя, а также толщину покрытия путем проб и ошибок, по аналогии с уже реализованными техническими решениями или на основании личного опыта и знаний. Ключевой проблемы трибологического материаловедения топокомпозитов является отсутствия методик создания (расчета) рациональной конструкции топокомпозита. Хотя теория контактного взаимодействия в настоящее время достигла определенных успехов, вследствие математических трудностей возник некоторый разрыв между теорией и практическим применением этих решений для конкретных задач, в частности для слоистых тел, взаимодействие с которыми рассматривается как неклассическая задача.

В ИМАШ РАН в Лаборатории исследования износа при высоких температурах проведены работы по теории контактного взаимодействия твердых тел с топокомпозитной структурой, исследована работоспособность твердых тел с тонкими покрытиями в условиях действия высоких локальных контактных нагрузок при трении и без. Проведен анализ состояния вопроса по объективной оценке параметров качества и работоспособности топокомпозитов триботехнического назначения по обеспечению предельной несущей способности по различным критериям – возникновению пластической деформации, расслоению и разрушению покрытий. Рассмотрена механика контактного взаимодействия жесткого и упругого сферического индентора с двухслойным упруго-пластичным полупространством, имитирующим твердое тело с упрочненной твердым покрытием поверхностью. Теоретически установлены и исследованы локальные области неординарного изменения величин предельного внедрения и несущей способности от толщины поверхностного слоя. Специфическое поведение слоистых систем подтверждено численными расчетами. Исследованы случаи силового взаимодействия жесткого сферического штампа при наличии трения в контакте со слоистой системой, вида и величины остаточных напряжений в покрытии, наличия нескольких слоев различных материалов в покрытии, характера изменения эпюры давления в контактной области топокомпозитной поверхности в зависимости от толщины покрытия и соотношения упругопластических свойств компонентов топокомпозита. Оценен вклад сил адгезионного взаимодействия на границе раздела покрытие – основа на несущую способность и характер разрушения покрытия. Разработаны оригинальные методики и исследовательские комплексы для оценки геометрически и механических характеристик поверхностей топокомпозитов триботехнического назначения. Получено более 15 патентов на изобретения.

## Исследование материалов рабочих органов на абразивный износ

Гайдар С.М., Ветрова С.М.\*, Барчукова А.С., Балькова Т.И.

\*E-mail: s.vetrova@rgau-msha.ru

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

Изнашивание рабочих органов является закономерным процессом, неизбежно сопровождающим работу машин и механизмов. Изнашивание приводит к изменению размеров, формы и состояния рабочих поверхностей деталей и тем самым вызывает постепенное снижение функциональных качеств и производительности машин, а также возрастание вероятности отказа.

Все детали рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и землеройных машин подвержены абразивному износу в нефиксированной абразивной массе – почве. Однако не каждое зерно на поверхности трения способно вступать в контакт с металлом, а скорость относительного перемещения частиц почвы значительно меньше поступательной скорости рабочего органа почвообрабатывающей машины [1]. Кроме того, большая часть частиц имеет округлую форму и в процессе движения по поверхности рабочего органа занимает более устойчивое положение по отношению друг к другу и к изнашиваемой поверхности. Поэтому почву необходимо рассматривать, как твердое тело с весьма шероховатой поверхностью и подвижным активным слоем.

Для моделирования процессов абразивного изнашивания применяют лабораторные методы с использованием различных установок, обеспечивающих взаимодействие образцов или фрагментов рабочих деталей с абразивными частицами, присутствующими в почве [2].

Целью данного исследования является изучение закономерностей изменения относительной износостойкости материалов для изготовления рабочих органов сельскохозяйственных машин в зависимости от химического состава и условий абразивного изнашивания.

Выявление закономерностей относительной износостойкости при изменении физико-механических свойств материала имеет большое практическое значение. Химический состав и термическая обработка металла во многом предопределяет износостойкость и являются факторами, определяющими механические свойства материала. Исследование по установлению зависимости между износостойкостью при абразивном изнашивании и твердостью исследуемых материалов приведены на рис.1.

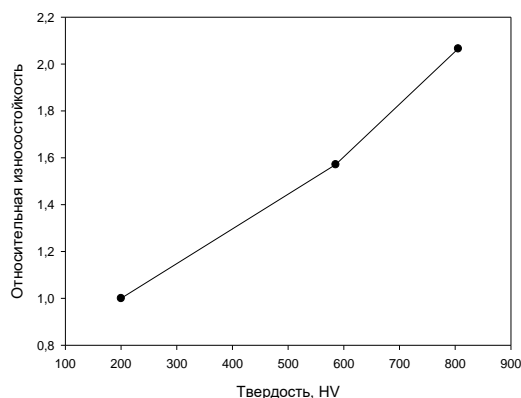


Рис.1. Зависимость относительной износостойкости от твердости материала

Для испытаний были выбраны образцы сталей 0,25C-1,6Si-1,47Mn-0,51Cr-0,27Mo и 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti с термической обработкой состоящей из нагрева до 900 °С, выдержкой при этой температуре и последующего быстрого охлаждения в воде. При закалке повышается прочность, твердость и износостойкость сталей. Так для стали 0,25C-1,6Si-1,47Mn-0,51Cr-0,27Mo была достигнута твердость 805,2 HV. Твердость стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti составила 585,3 HV. В качестве эталонного образца была принята сталь 45 с твердостью 200 HV.

В результате сравнительных испытаний по определению относительной износостойкости установили, что повышение твердости материала при абразивном износе приводит к снижению интенсивности изнашивания в 2 раза.

[1]. Износ деталей сельскохозяйственных машин / под ред. д-ра техн. наук проф. М. М. Севернева. - Ленинград: Колос. [Ленингр. отд-ние], 1972. - 288 с.

[2]. Комбинированные лабораторные исследования материалов рабочих органов на абразивный износ / С. А. Сидоров, С. Н. Поткин, Д. А. Миронов, И. В. Лискин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 6. – С. 21-26.

## Модели дискретного контакта и их приложения в трибологии

Горячева И.Г., Яковенко А.А.

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия  
goryache@ipmnet.ru

### Цель

Разработка математических моделей, позволяющих анализировать влияние параметров микрогеометрии поверхностей на характеристики контактного взаимодействия упругих и вязкоупругих тел (сближение контактирующих поверхностей, распределение номинальных и фактических контактных давлений, номинальную и фактическую область контакта, распределение внутренних приповерхностных напряжений и т.д.).

### Постановка контактной задачи и методы ее решения

Построено решение контактной задачи о внедрении жесткого шероховатого тела цилиндрической формы в упругий слой, сцепленный с жестким основанием или лежащий на нем без трения (рис. 1а).

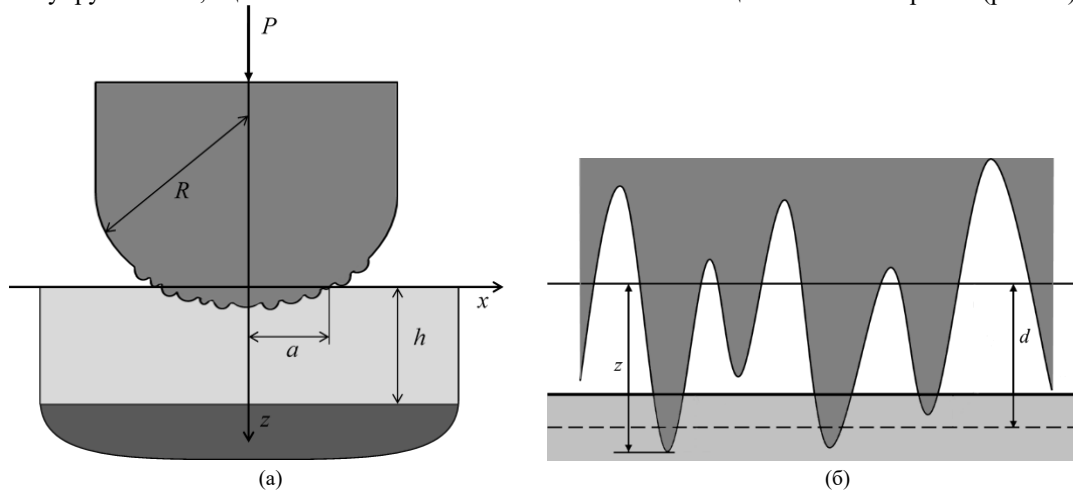


Рис. 1. Схема контакта на макро- и микро- масштабных уровнях

Задача рассматривается на двух масштабных уровнях [1]. На микро-масштабе исследуется контактное взаимодействие жесткого полупространства, имеющего шероховатую поверхность (рис. 1б), с упругим полупространством. Предполагается, что контактирующие поверхности неровностей имеют сферическую форму, а их распределение по высоте носит вероятностный характер и описывается функцией Гаусса. Решение задачи строится с учетом взаимного влияния микроконтактов на основе метода локализации [2]. Проведен анализ зависимостей фактической области контакта и сближения тел от номинального давления, а также максимальных давлений на пятнах фактического контакта от параметров микрогеометрии поверхности.

Полученная зависимость сближения тел от номинального давления при заданных параметрах шероховатости (функция дополнительного смещения) использована затем для постановки контактной задачи на макроуровне. В результате задача определения распределения номинальных давлений в области контакта сведена к решению интегрального уравнения второго рода [2,3]. Установлены особенности распределения номинальных контактных давлений при учете параметров микрогеометрии поверхностей взаимодействующих тел.

### Результаты

Разработан алгоритм решения контактных задач для деформируемых тел с учетом их макроформы и параметров микрогеометрии поверхностей. На основании построенных решений проведен анализ влияния шероховатости контактирующих тел и их механических свойств на характеристики номинального контакта (номинальную площадь контакта и распределение контактных давлений) и сближение тел под нагрузкой, а также определены фактическая область контакта и распределение фактических давлений на отдельных пятнах контакта. Полученные результаты использованы для оценки толщины напряженного подповерхностного слоя и возможности возникновения под поверхностью пластических деформаций.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-49-02010.

[1] Goryacheva I.G. Mechanics of discrete contact. Tribol. Int., 2006. Vol. 39, N 5, p. 381-386.

[2] Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.

[3] Горячева И.Г., Яковенко А.А. Внедрение в тонкий вязкоупругий слой жесткого цилиндра с плоским шероховатым основанием. ПМТФ, 2021. Т. 62, N 5, с. 22-37.



## Повышение износостойкости защитного покрытия забойных телеметрических систем

Денисов О.В., Малышев В.Н.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

denisov8428@gmail.com

**Цель.** Повышение износостойкости защитного покрытия ЗТС, содержащего штифты из ВК8 в инконелевой матрице, с помощью лазерной закалки.

**Введение.** Бурение эксплуатационных нефтегазовых скважин сложного профиля, в особенности с горизонтальными участками, не обходится без MWD или LWD систем для каротажа. Забойные телеметрические системы (ЗТС) представляют собой высокотехнологичное и наукоёмкое оборудование, используемое для каротажа в процессе бурения нефтегазовых скважин. Проводимые ЗТС каротажные исследования, способствуют определению положения забойной компоновки в пространстве, состава геологического разреза и наличия флюидоносных пластов. Во время бурения ЗТС подвергаются абразивному, гидроабразивному износу и коррозионному поражению при температуре до 180 °С, давлении до 150 МПа и контактном давлении до 3 МПа.

**Материалы и методы.** В работе рассматривался способ повышения износостойкости ЗТС методом лазерной закалки исходного защитного покрытия (ИЗП), которое представляет собой вставки из спеченного твердого сплава ВК8ВК Г54 6×4+ф ГОСТ 880-75 (далее ВК8), погруженные на четверть высоты в корпус прибора. Пространство между возвышенностями штифтов ВК8 упрочнено мелкодисперсным порошком (150 мкм), содержащим 60 % WC и 40 % никелевого сплава (инконеля) с помощью газопламенной или лазерной наплавки. Упрочняющее покрытие имеет толщину до 3 мм и наплавляется поверх инконелевого подслоя толщиной 1 мм, который наносится тем же образом.

Перед лазерной закалкой на ИЗП наносилось светопоглощающее двухслойное покрытие: первый слой — лак АС-82 и сажа (3:1), второй слой — лак и растворитель (1:4). Лазерная закалка ИЗП выполнялась иттербиевым волоконным лазером YLS-6000-U. Приращение микротвердости поверхности и по глубине определялось твердомером Виккерса Durascan-20 по HV10, ГОСТ Р ИСО 6507-1—2007.

**Результаты и обсуждение.** Был выполнен эксперимент по выявлению наибольшего приращения износостойкости по глубине и соответствующей секундной плотности мощности лазера, как показано на рис. 1. Приращение теоретической износостойкости определялось замерами твердости по глубине с последующим интегрированием «методом трапеции». В результате твердость поверхности повысилась на  $6,2 \pm 5,4 \%$ , а теоретическая износостойкость на глубину 3 мм на  $4,33 \pm 0,05 \%$

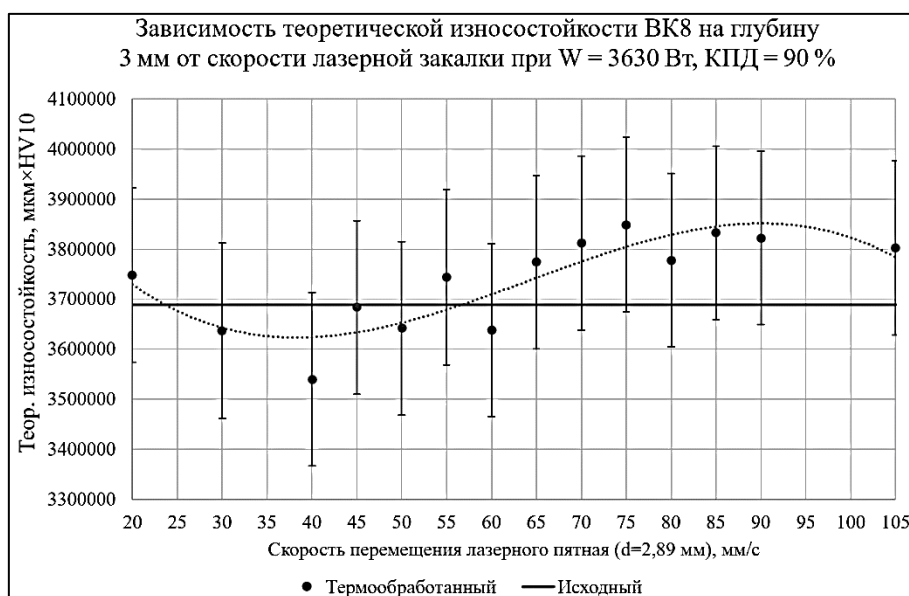


Рис. 1. Приращение износостойкости

**Выводы.** Учитывая среднюю величину наработки ЗТС — 600 часов, экономический эффект от лазерной закалки может составить до 3,8 млн. руб., что подтверждает целесообразность использования этой технологии. Это достигается сокращением количества спуско-подъемных операций при бурении скважин.

## Перспективная схема планетарной фрезерной головки для срезания припусков с крупногабаритных заготовок

Ерофеев М.Н., Пухальский В.А., Офицеров О.О.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

ofitserov@imash.ru

При обработке крупногабаритных заготовок, в частности корпусных деталей несущей системы тяжелых станков, возникают серьезные трудности, связанные с необходимостью снятия больших припусков с широких плоскостей. При обработке таких поверхностей наиболее актуальными являются решения, связанные с повышением производительности обработки и сокращением расхода используемого режущего инструмента.

Одним из наиболее распространенных методов обработки плоских поверхностей является торцовое фрезерование. Поэтому с целью анализа и определения решений, повышающих эффективность этого процесса, были рассмотрены различные схемы торцового фрезерования.

Фрезерование – это один из сложнейших, с точки зрения кинематики, методов обработки резанием. Главными особенностями этого метода обработки являются: прерывистость резания и переменность в процессе образования реза его толщины по его длине. При этом траектория, описываемая режущей кромкой зуба торцовой фрезы, соответствует удлиненной циклоиде. Рез многозубой фрезы по сравнению с однозубой более длинный, менее толстый, а циклоида, по которой движется режущая кромка у многозубой фрезы, более вытянута. Исходя из зависимостей стойкости и прочности фрезы от ее смещения [1, 2], наилучшие результаты можно получить при встречном фрезеровании.

Следовательно, при обработке серого чугуна при фрезеровании с шириной меньше диаметра фрезы наилучшим с точки зрения прочности и стойкости инструмента являются условия фрезерования, при которых врезание зуба происходит с тонких и заканчивается толстыми резами.

Известно также, что большую стойкость имеют фрезы, обладающие большим диаметром. Кривизна реза в случае малого диаметра больше, чем в случае большого диаметра, вследствие чего условия образования стружки более тяжелые. Рассмотрены резы, получаемые при фрезеровании однозубой и многозубой фрезами. Обработка плоскостей с шириной значительно превышающей диаметр фрезы осуществляется за несколько проходов. Фрезерование с шириной меньше диаметра фрезы, отличающиеся смещением фрезы относительно заготовки бывает симметричным, встречным, попутным.

Рассмотрены условия фрезерования серого чугуна, с точки зрения прочности и стойкости инструмента, и разные схемы торцового фрезерования. Рассмотрены схемы, где рез осуществляется одноступенчатыми фрезами, многоступенчатыми фрезами, фрезами с совмещением черного и чистового проходов, сложные регулируемые фрезы и планетарные фрезерные головки. Все схемы так или иначе имеют преимущества и недостатки.

Для того, чтобы убрать минусы рассмотренных схем и значительно повысить производительность в целом, предлагается новая схема (рис. 1) – соединение нескольких уже имеющихся схем, нивелирующая их слабые стороны.

Предложенная схема предусматривает обработку широких поверхностей фрезами малых диаметров с регулированием угла в плане  $\varphi_2$  и  $\varphi'_2$ , при применении планетарной схемы фрезерования. При использовании предлагаемой схемы будут ликвидированы все холостые ходы зубьев фрез и самих фрез, толщина снимаемого слоя – наиболее высока. И по предварительным расчетам, можно добиться того, что толщина снимаемого за проход припуска может быть равна диаметру фрез, а ширина диаметру планетарной головки. Кроме того, в случае наличия адаптации параметров планетарной головки (в связи с наличием возможности их регулирования) относительно снимаемого припуска, эффективность съема припуска может быть существенно повышена.

[1]. Этин А.О. Влияние условий врезания торцевой фрезы на ее стойкость. Сборник «Динамика процесса резания металлов». М.: ЭНИМС, ГНТИ машиностроительной и судостроительной промышленности, 1953. – с. 50-70

[2]. Ильченко Н.Я. Исследование прочности режущей части торцевых твердосплавных фрез в условиях тяжелого машиностроения и станкостроения. Диссертация к.т.н. – Краматорск, 1969

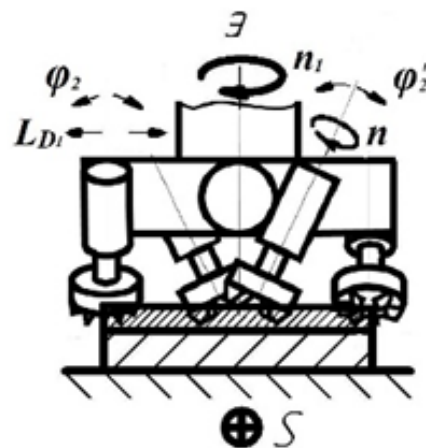


Рис. 1. Схема фрезерной головки

## Триботехнические свойства ферромагнитных наносuspензий

Задошенко Е.Г.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия  
zadoshenko@rambler.ru

В настоящее время к перспективным наноматериалам относится магнетит. Известно его применение в трибологии в качестве добавки к смазкам и для создания магнитных жидкостей [1].

Целью данной работы является исследование триботехнических показателей ферромагнитной наносuspензии.

Ферромагнитные наносuspензии получали путем ультразвукового диспергирования наночастицы магнетита, стабилизированных олеиновой кислотой в углеводородную основу. Для одной ферромагнитной наносuspензии в качестве углеводородной основы использовали додекан (МЖ1), для другой вазелиновое масло (МЖ2). Коагуляционную стабильность магнитных жидкостей изучали экспериментально при добавлении к ним электролитов. Полученные ферромагнитные наносuspензии испытывали на четырехшариковой машине трения согласно ГОСТу и на машине трения торцевого типа УМТ-200 при скорости 200 об/мин и нагрузке 98 Н.

Как показали результаты исследований (таб.1) МЖ1 имеет самые низкие показатели по диаметру пятна износа по сравнению с МЖ2 и основными компонентами. Уменьшение диаметра пятна износа с добавлением можно объяснить с помощью двух явлений: эффекта полировки и эффекта сглаживания [2]. В случае с МЖ1 за счет своей меньшей коагуляционной стабильностью под действием нагрузки наночастицы магнетита быстрее оседают и заполняют поверхностные неровности контакта. При этом не происходит контакт металла с металлом, что способствует снижению износа. Сравнительный анализ показателей критической нагрузки ( $P_k$ ), нагрузке сваривания ( $P_c$ ), индекса задира ( $I_z$ ) показывает, что МЖ1 является более устойчивой к высоким нагрузочным режимам, поскольку по такому показателю, как нагрузка сваривания превосходит олеиновую кислоту. Хотя по двум остальным показателям уступает ей. Высокие противозадирные свойства олеиновой кислоты связаны с ее строением и высокой адсорбционной способностью на поверхности металла. Также следует отметить, что МЖ1 по всем показателям превосходит триботехнические характеристики жидкости носителя додекана.

Улучшение триботехнических показателей ферромагнитных наносuspензий по сравнению базовой основой обусловлено наличием наночастиц магнетита, которые имеют высокое сродство к металлическим поверхностям. Они способны легко адсорбироваться на поверхности трения, пополняют борозды и впадины и тем самым не допускают контакт металла с металлом. Возникшие разделительные структурированные слои обладают устойчивостью к разрушению под действием нагрузок, температур и сдвиговых напряжений, что в конечном итоге приводит к повышению износостойкости узлов трения.

Таблица 1. Результаты трибологических исследований

Исследуемый смазочный материал	Средний диаметр пятна износа $D_{и}$ (ср), при часовых испытаниях, мм	Критическая нагрузка $P_k$ , Н	Нагрузка сваривания $P_c$ , Н	Индекс задира $I_z$	Коэффициент трения
МЖ 1	0,4	617	1960	24,6	0,15
МЖ 2	0,73	392	980	20,6	0,16
Вазелиновое масло	0,59	314	1235	16,7	0,08
Олеиновая кислота	0,50	784	980	36,9	0,12
Додекан	0,63	392	1568	15,4	0,1

Наряду с противозадирными и противозадирными свойствами смазочных материалов важным показателем в трибологии является их антифрикционные свойства. Следует отметить, что исследуемые магнитные наносuspензии имеют более высокие значения коэффициента трения по сравнению с олеиновой кислотой и базовыми основами. Высокие показатели коэффициента трения МЖ1 и МЖ2 связаны с тем, что частицы магнетита сферической формы являются жесткими, попадая в зону контакта, изменяют режим трения с трения скольжения на смешанное трение скольжения и качения. Такая смена режима и морфологические особенности частиц магнетита приводят к увеличению значений коэффициента трения.

Таким образом, трибологические исследования показали, что МЖ1 проявляет лучшие противозадирные, противозадирные по сравнению с МЖ2 и базовыми основами, что связано с процессом сглаживания поверхностей контакта за счет адсорбции наночастиц магнетита в зоне трения.

[1] Lineira del Rio J. M. et al. Tribological behavior of nanolubricants based on coated magnetic nanoparticles and trimethylolpropane trioleate base oil // Nanomaterials. – 2020. – Т. 10. – №. 4. – С. 683.

[2] Meng X. et al. Oleic acid surface modification in the preparation of magnetic nanoparticles by a chemically induced transition // IEEE Transactions on Magnetics. – 2017. – Т. 54. – №. 1. – С. 1-7.

[3] Chouhan M. et al. An investigation on the optimization of anti-wear performance of nano- $Fe_3O_4$  based ferro-magnetic lubricant // Jurnal Tribologi. – 2020. – Т. 25. – С. 119-135.

## Исследование свойств кремнийорганических покрытий, сформированных на стальной основе плазмохимическим осаждением из паровой фазы

Карцев С.В., Кулаков О.И., Святищук Н.Н.

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

kartsev@imash.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований свойств кремнийорганических покрытий, формирование которых на поверхности детали осуществлялось при бескамерном химическом осаждении из паровой фазы с применением жидких элементоорганических соединений и активации электродуговой плазмы при атмосферном давлении. Определены триботехнические свойства кремнийорганических покрытий. Рабочие поверхности деталей технологического оборудования, изготавливаемые из конструкционных и инструментальных сталей, покрывают слоем специального состава, обладающего лучшим сочетанием функциональных характеристик. Одним из экономически целесообразных, универсальных и распространенных методов формирования кремнийорганических покрытий является процесс разложения паров жидких легкоиспаряющихся химических реагентов, вводимых в дуговой разряд плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием износостойкого тонкопленочного покрытия на поверхности детали [1]. Работа посвящена исследованию структуры, а также триботехнических свойств кремнийорганических покрытий на основе карбида и диоксида кремния, сформированных в безвакуумном пространстве при атмосферном давлении, на поверхности детали плазменным методом.

Для расширения областей применения и повышения указанных характеристик были проведены экспериментальные исследования по определению триботехнических свойств кремнийорганических покрытий. Для решения поставленной задачи кремнийорганическое покрытие формировали на поверхности образца плазменным методом в безвакуумном пространстве при атмосферном давлении. Образцы изготавливались из конструкционной стали марки 40Г (ГОСТ 1050-2013), прошли механическую обработку, а также операции шлифования и полирования. В качестве жидких легкоиспаряющихся химических реагентов использовали кремнийорганическую жидкость. В процессе нанесения кремнийорганического покрытия параметры плазменного упрочнения поддерживались постоянными: ток дуги плазмотрона 100 А; расход плазмообразующего газа 2,2 л/мин; расход транспортирующего газа 1,0 л/мин; расход защитного газа 1,2 л/мин; расстояние от сопла плазмотрона до поверхности образца 18 мм.

Для усиления адгезии покрытия и интенсификации процесса адсорбции осуществляли предварительный и сопутствующий подогрев поверхности образца. При этом температура изменялась от 18 до 200 °С, а время нанесения покрытия – от одной до двух минут. Это связано с протеканием химических реакций взаимодействия оксидов кремния покрытия и оксидов железа поверхности образца [2].

Микрорельеф рабочих поверхностей образцов исследовавшийся на модернизированном оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21 показал однородную шероховатость, присущую поверхностям после плазменного упрочнения. Микрорельеф поверхностей до плазменного упрочнения имеет явно выраженные множественные риски от обработки поверхности шлифованием. Изменение рельефа поверхности после плазменного упрочнения является подтверждением того, что покрытие осаждается на микрорельеф поверхности, заполняя тем самым дефектные зоны, образованные после окончательной обработки поверхности образца, которая обеспечивает получение шероховатости поверхности в пределах среднего арифметического отклонения профиля  $R_a = 0,38$  мкм. Триботехнические характеристики кремнийорганических покрытий оценивали в условиях сухого трения скольжения на модернизированной установке ИИ 5018 [3] по схеме «диск-диск» с нагрузкой 130 Н. С целью определения значений коэффициента трения в процессе испытаний проводили непрерывный обсчет параметров в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения LabView. Частота вращения во всех экспериментах оставалась постоянной и составляла 600 об/мин, время испытания для каждой пары образцов составило 600 с, а полный путь трения – 943 м. Износ испытываемых образцов оценивали по величине объёмной интенсивности изнашивания,  $I_v$ , мм<sup>3</sup>/м:

$$I_v = \Delta / (\rho \cdot L_{mp}), \quad (1)$$

где  $L_{mp}$  – полный путь трения;  $\rho$  – плотность материала образца;  $\Delta$  – потеря массы образца.

Сопоставление значений объёмной интенсивности изнашивания показывает, что кремнийорганическое покрытие обладает на 40% лучшей износостойкостью по сравнению с образцами без покрытий. Это связано с присутствием в составе кремнийорганического покрытия более прочных частиц диоксида кремния  $SiO_2$ , относящихся к группе стеклообразующих оксидов, обладающих высокой твёрдостью и прочностью.

[1]. Горленко А.О. Технология финишного плазменного упрочнения для повышения ресурса металлорежущего инструмента / А.О. Горленко, П.А. Тополянский, А.П. Тополянский, Н.А. Соснин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 3 (299). – С. 66–74.

[2]. Карцев С.В. Восстановление и упрочнение деталей технологического оборудования свеклосахарного производства плазменным методом: дис. ... д-ра техн. наук: 4.3.1. / Карцев Сергей Васильевич. – Москва, 2023. – 425 с.

[3]. Кулаков О.И., Албагачиев А.Ю. Модернизация машины трения ИИ 5018 / О.И. Кулаков, А.Ю. Албагачиев // *Научные труды VI международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»*. – 2019 – С.244-245.

## Трибологические методы повышения коэффициента трения взаимодействующих поверхностей тяговых транспортных средств

Керопян А.М.

ООО «Московский научно-исследовательский проектно-исследовательский институт технологий и инноваций» (МНИПИТИ), Москва, Россия  
am\_kerop@mail.ru

Несмотря на то, что выполнены многочисленные фундаментальные исследования, пока отсутствует единая, общепринятая теория трения взаимодействующих поверхностей [1, 2]. Это объясняется многофакторностью процесса протекания фрикционного взаимодействия трущихся поверхностей.

Их истории известно, что впервые процесс трения был исследован Леонардо да Винчи. Полученные результаты в дальнейшем были подтверждены Амонтоном. Во главу угла при исследовании процесса трения было положено, что взаимодействующие поверхности являются абсолютно твердыми [1, 2].

Основываясь на имеющиеся результаты исследований, современная классическая механика утверждает, что сила трения двух взаимодействующих тел в достаточно широких пределах не зависит от площади соприкасающихся поверхностей [3]. Данное утверждение является следствием того, что в классической механике, основанной на законах Кулона-Амонтона (а, точнее, Леонардо да Винчи – Амонтона) принято считать взаимодействующие тела абсолютно гладкими, т.е. лишенными каких-либо шероховатостей.

Современная теория контактного взаимодействия соприкасающихся тел, являющаяся предметом изучения науки, именуемой **ТРИБОЛОГИЯ**, получившая развитие в работах И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина, А.В. Чичинадзе, Ю.М. Лужнова и их учеников, считает контакт взаимодействующих тел дискретным, т.е. точечным, и состоящим из множества точечных контактов, обусловленных взаимодействием выступов микрошероховатостей площадок контакта взаимодействующих тел [2].

Исследованиями, выполненными А.М. Керопяном, установлено, что рациональной шероховатостью пар трения типа «колесо – рельс» является шероховатость  $R_z 20-40$  мкм. Взаимный контакт деталей первоначально происходит по выступам поверхностей на высотах, образованных микронеровностями (рис. 1).

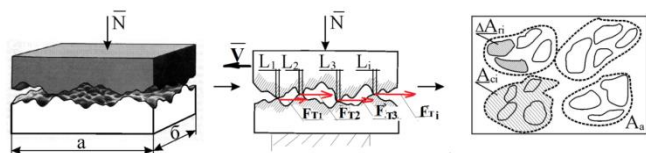


Рис. 1 Схема реального контакта твердых деталей и схема образования реального значения силы трения в пятне контакта.

Таким образом, суммарная сила трения зависит от фактической площади касания контактирующих поверхностей, что является важным фактором повышения силы трения и, как следствие, увеличения коэффициента трения контактирующих поверхностей тяговых транспортных средств.

Как следует из молекулярно-механической теории внешнего трения и усталостной теории изнашивания твердых тел фрикционно-износные характеристики и механические свойства материалов пар трения находятся в различных нелинейных функциональных зависимостях. При этом эти зависимости могут существенно меняться в зависимости от режима трения и, в первую очередь, от теплового и температурного режимов. Это иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 2 [2].

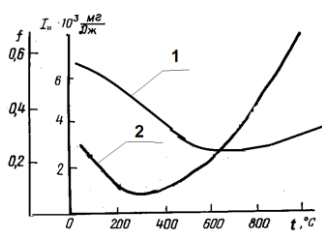


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (1) и интенсивности износа (2) от температуры поверхности трения при трении колесной стали в паре с легированным чугуном ЧНМХ при вертикальной нагрузке 1,5 МПа [2]

Как видно из рис. 2, зависимости коэффициента трения  $f$  и интенсивности износа  $I_{и}$  от температуры поверхности трения нелинейны.

Сравнительный анализ графиков на рис. 2 показывает, что минимальное значение интенсивности износа достигается при температуре около 300 °С. Таким образом, следующим, не менее важным фактором повышения коэффициента трения взаимодействующих поверхностей тяговых транспортных средств является **температура в зоне контакта взаимодействующих тел**. Анализ результатов расчета максимальных значений коэффициентов трения показал, что при профилировке рельсов с обеспечением шероховатости  $R_z 20$  мкм расчетный коэффициент трения может быть повышен до 12 %. Для улучшения тяговой способности локомотивов, следует ограничить температуру в зоне контакта рабочих поверхностей колеса и рельса в пределах 300 °С. Реализация предлагаемых технических решений с применением **трибологических методов исследований** позволит обеспечить возможность повышения коэффициента трения взаимодействующих поверхностей тяговых транспортных средств до 27 %.

[1]. Гуковский М.А. Механика. Леонардо да Винчи. Изд. АН СССР, 1947. – 815 с.

[2]. Чичинадзе А.В., Браун Э. Д., Буше Н.А. и др./ Под. ред. А.В. Чичинадзе. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов. – М.: Машиностроение, 2001. – 778 с. ISBN: 5-217-03053-4.

[3]. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. Учебник для вузов. – М.: Высш.шк., 2010. – 416 с.

## Технологические особенности формирования параметров качества диффузионного слоя на поверхности стали марки 12ХН3А при микродуговом воздействии

*Китаев Н. И.* – аспирант, *Пичхидзе С. Я.* – д. т. н., ст. науч. сотр., профессор  
СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия  
e-mail: kitaev-1995@mail.ru

**Цель.** Исследовать влияние микродугового воздействия в предлагаемой хромсодержащей обмазке на структурно-фазовое состояние, микротвёрдость и износ поверхностных слоёв хромоникелевой стали марки 12ХН3А.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследования является структурно-фазовое состояние и механические характеристики (шероховатость, микротвёрдость, износ) стали марки 12ХН3А после её диффузионного насыщения в предлагаемой хромсодержащей обмазке. Исследование структурно-фазового состояния осуществляли методами РЭМ и ЭДРА. Значения шероховатости поверхности измеряли профилографом-профилометром Mitutoyo Surftest SJ-410, а значения микротвёрдости поверхности микротвердомерами «HVS-1000» и «ПМТ-3М». Износ исследовался на настольном токарно-винторезном станке «Витязь 1Н628В».

**Результаты и их обсуждение.** Для достижения заявляемого результата на поверхность подложки наносится слой (~ 1 мм) хромсодержащей обмазки [1, 2], в составе: 50 мас. % соли уксусной кислоты и 2-моноэтаноламина в соотношении 1:1, а также 25 мас. % порошка сажи и 25 мас. % оксида хрома, вступающей во взаимодействие с материалом подложки при микродуговом воздействии с образованием химических соединений, обладающих нужным набором физико-механических свойств.

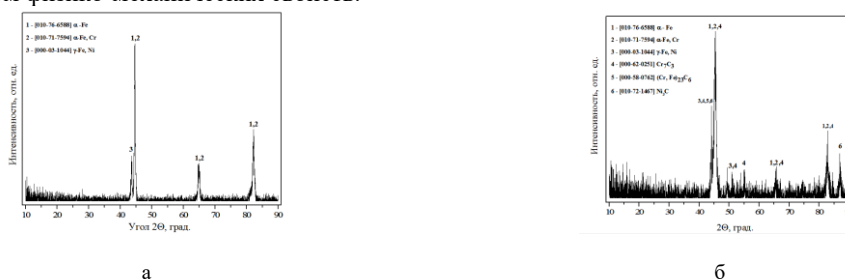


Рис. 1. Рентгенограмма стали марки 12ХН3А, где: (а) в исходном состоянии, (б) после диффузионного насыщения в синтезированной хромсодержащей обмазке под действием микродугового нагрева

Анализ рентгенограммы структурно-фазового состояния стали марки 12ХН3А «рис. 1» показал, что в структуре исходной стали содержится одна фаза железа:  $\alpha$ -Fe с ОЦК решёткой. После диффузионного насыщения в структуре поверхностного слоя образуются рефлексы, включающие карбиды хрома, железа и никеля:  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Ni}_3\text{C}$ . Предварительно, в программном комплексе «ELCUT 5.1», проведено моделирование тепловых процессов, возникающих в результате диффузионного хромирования микродуговым воздействием, и определены рациональные значения силы тока, температуры и времени выдержки. В «табл. 1» показано влияние силы тока, температуры и времени выдержки на значения шероховатости и микротвёрдости поверхности с Cr-слоем.

Таблица 1. Значения шероховатости и микротвёрдости образца с Cr-слоем при различных режимах микродугового воздействия

Образец	Сила тока ( $I_u$ , А)	Температура ( $T$ , °С)	Время выдержки ( $t$ , мин)	Шероховатость, ( $R_a$ ) / класс	Микротвёрдость, $\text{HV}_{0,2\text{H}}$
исх.	-	-	-	0,320 / 9	200±30
1	2,5	950 ± 30	4,5 ± 0,5	0,443 / 8	380±30
2	3,0	1100± 30	4,5 ± 0,5	0,447 / 8	415±30
3	3,6	1325 ± 30	4,5 ± 0,5	0,449 / 8	410±30
4	2,5	950 ± 30	9,5 ± 0,5	0,441 / 8	450±30
5	3,0	1100± 30	9,5 ± 0,5	0,445 / 8	530±30
6	3,6	1325 ± 30	9,5 ± 0,5	0,452 / 8	550±30

Анализ данных «табл. 1» показывает, что диффузионное хромирование микродуговым воздействием оказывает незначительное снижение класса шероховатости поверхности с 9 до 8, а максимальной микротвёрдостью обладают слои, полученные при более высокой температуре и времени выдержки. В среднем микротвёрдость увеличилась в 3 раза. Испытания на износ стального образца с Cr - покрытием показали повышенную в 3 раза износостойкость к истиранию в сравнении с исходным образцом.

[1] Гаврилов В. П. Особенности составов рабочих смесей, характеристика процесса диффузионного хромирования и его разновидностей. – 2015.

[2] Диффузионное насыщение сталей из насыщающих обмазок / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, Т. А. Бруль // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 4. – С. 38.

## Повышение износостойкости клапанных уплотнений типа «металл-металл» посредством применения газотермических покрытий

<sup>1</sup>Ковалев А.А., <sup>2</sup>Мокану А.А., <sup>3</sup>Краско А.С., <sup>3</sup>Преображенская Е.В., <sup>2</sup>Кулаков О.И.

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

<sup>2</sup> Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;  
toni-blic-mokanu@mail.ru

<sup>3</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Пневматические устройства наряду с механическими, гидравлическими и электрическими являются одними из наиболее широко применяемых в различных отраслях промышленности, что обусловлено относительной простотой конструкции и обслуживания, надежностью работы при значительных уровнях вибрации и в широком диапазоне рабочих температур. В связи с этим номенклатура подобных изделий постоянно расширяется [1].

Работа пневматических устройств основывается на использовании энергии газа под давлением и в связи с этим при их проектировании одной из основных задач является необходимость обеспечения герметичности конструкции. Клапанные уплотнения, помимо обеспечения герметичности, являются основным узлом пневматических устройств, от которых зависят габаритно-массовые параметры, надежность и энергопотребление. Работа клапанных уплотнений типа «металл-металл» основана на упругой деформации. При этом герметичность обеспечивается за счет увеличения контактного давления или посредством повышения требований к точности и шероховатости рабочих поверхностей конструкции [2].

Клапанные уплотнения часто подвержены динамическим, коррозионным и эрозионным разрушениям, вызывающим наибольшее количество отказов пневматических устройств. При этом в процессе их эксплуатации механические воздействия, такие как ударные и вибрационные нагрузки, приводят к чрезмерному износу рабочих поверхностей клапанных уплотнений рассматриваемого типа. На «рис. 1» представлено сравнение рабочих поверхностей клапанов, изготовленных из материала ЛС59-1: слева нормальный износ после притирки поверхностей, справа износ клапана после срабатывания в 50 000 циклов.



Рис.1. Сравнение рабочих поверхностей клапанных уплотнений

Вид износа, представленный справа, образовался в результате ударных нагрузок на рабочую поверхность клапана вследствие резких перепадов давления в контурах пневматического устройства. Образование подобных дефектов приводит к нарушению герметичности уплотнения, нарушению нормальной работы или отказу пневматического оборудования. При обслуживании подобных пневматических устройств проводят замену изношенных деталей, что с учетом их высокой стоимости сопряжено со значительными затратами, которые растут с увеличением объемов выпуска таких изделий.

С целью снижения указанных затрат предлагается повышение износостойкости клапанных уплотнений посредством использования износостойких «уплотнительных вставок», изготовленных технологией газотермического напыления. Износостойкость покрытий, полученных таким методом, доказана авторами в ранних работах [3]. Таким образом, предлагается изменение конструкции клапана в части внедрения «уплотнительных вставок» посредством напыления уплотнительных износостойких покрытий на кольца, изготовленные из углеродистой стали, с последующей механической обработкой рабочей поверхности, после которой следует установка «уплотнительных вставок» на корпус рабочего клапана. На «рис.2» представлен эскиз опытного клапана.

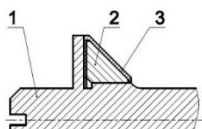


Рис.2. Эскиз опытного клапанного уплотнения

На поз.1 показан корпус клапана, поз.2 – кольцо, на которое наносится покрытие методом газотермического напыления, поз.3 – уплотнительное износостойкое покрытие.

В перспективе применение уплотнительных газотермических покрытий позволит увеличить износостойкость клапанных уплотнений типа «металл-металл», улучшить функциональность работы пневматических устройств, а также унифицировать процесс изготовления подобных изделий за счет внедрения широкой номенклатуры «уплотнительных вставок».

[1]. Королёв В.А., Стажков С.М. Элементы пневматического привода, СПб, .2020, 57 с.

[2]. Безродный И.И., Кондрашов Ю.И. Перспективы использования различных клапанных уплотнений для агрегатов, работающих при сверхнизких температурах и динамических нагрузках // Проектирование, производство, эксплуатация авиационной техники и организация транспортных процессов, 2021. №4 С 133-134.

[3]. Албагачиев А.Ю., Ковалев А.А., Краско А.С. Выбор метода упрочняющей обработки деталей машин в условиях автоматизированного мелкосерийного производства // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 2. С. 4-12.

## Расчет кинематики движения частицы при внедрении в поверхность вязкоупругого материала при ударном нагружении

Копченков В.Г.

Северо-Кавказский Федеральный университет, Ставрополь, Россия

kopchenkov2@rambler.ru

**Введение.** В таких отраслях промышленности как горнодобывающая, строительная и многих других связанных с перемещением абразивных масс, интенсивное изнашивание узлов и деталей машин связано с ударным воздействием абразивных частиц. В определенных условиях эксплуатации наиболее эффективным оказался метод гуммирования – футерование резиной деталей машин, подвергающихся ударному воздействию твердых частиц. Так гуммированные насосы имеют срок службы в 8...10 раз больше, чем грунтовые насосы из стали 55Л [1]. Выявление влияния сил трения, вязкоупругих свойств материала на формирование траектории и длины пути скольжения при ударе частицы по поверхности, дает возможность подойти к определению закономерностей разрушения и, в последующем, оценить износостойкость материалов, работающих в режиме изнашивания потоком абразивных частиц. Этот подход остается актуальным [2,3].

**Цель.** Определение и расчет основных характеристик кинематики движения частицы при внедрении в поверхность вязкоупругого материала, с целью определения важнейших характеристик трибоконтакта, пути трения и силы трения. Именно они определяют интенсивность изнашивания.

**Теоретическое исследование.** Вследствие несовершенной упругости эластомера удар сопровождается диссипацией энергии с изменением основных кинематических параметров частицы – скорости отскока и угла после удара. Схема соударения показана на рис. 1.

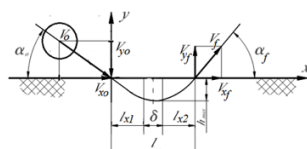


Рис.1 Схема взаимодействия частицы с поверхностью

Путь перемещения частицы при ударе по поверхности низко модульного материала, в общем случае, складывается из скольжения при внедрении  $l_{x1}$ , скольжения при отскоке  $l_{x2}$  и упругого смещения частицы совместно с материалом поверхности  $\delta$ . Длина пути внедряющейся частицы определяется соотношением величины силы трения и сдвиговой прочности материала поверхности, которая коррелирует с эластичностью и определяет вязкоупругие свойства материала. Соотношение отдельных составляющих пути трения меняется в зависимости от угла атаки. Величина смещения материала  $\delta$  на длину пути скольжения частицы не влияет. Но при угле атаки внутри конуса трения горизонтальное проскальзывание практически исчезает. Поэтому общее перемещение частицы по поверхности определится из сложения всех перемещений.

$$l = l_x + \delta = l_{x1} + l_{x2} + \delta. \quad (1)$$

Коэффициент восстановления тангенциальной составляющей скорости зависит от силы трения и его можно определить по соотношению угла внедрения  $tg\alpha_0$  и угла отскока  $tg\alpha_f$ . После ряда преобразований получим выражение для пути трения скольжения

$$l_x = \frac{V_{x0} \cdot t_1 \cdot \cos\alpha_0}{2} \cdot \left( 1 + \sqrt{S} \frac{tg\alpha_0}{tg\alpha_f} \right) \cdot \frac{1 + \sqrt{S}}{\sqrt{S}} \quad (2)$$

где  $t_1$  – время внедрения частицы в поверхность,  $S$  – эластичность эластомера,  $V_{x0}$  – начальная скорость.

Исследования на экспериментальной установке позволили получить значения угла отскока, скорости отскока и влияние эластичности на эти характеристики удара.

### Выводы.

1. Установлено, что с увеличением модуля упругости угол отскока снижается. С увеличением эластичности, угол отскока увеличивается.
2. Во всем, практически используемом, интервале изменения модуля упругости и эластичности резины угол отскока от поверхности резины отличается от угла атаки не более чем на  $\pm 8^\circ$ .
3. Коэффициент трения оказывает влияние на процессы контактно – фрикционного взаимодействия только при углах атаки менее  $30^\circ - 40^\circ$ .

[1]. Пенкин Н. С. Копченков В. Г. Сербин В. М и др. Гуммированные детали машин. — М.: Машиностроение. — 2013.

[2]. Uzi A., Levy A.. Energy absorption by the particle and the surface during impact //Wear.– 2018 V. 404–405, 92-110.

[3]. Arena G., Friedrich K. Solid particle erosion and viscoelastic properties of thermoplastic polyurethanes //Express Polymer Letters. –2015.Vol.9, No.3, 166–176.



## Особенности применения мобильного диагностического оборудования для оценки параметров работающих масел

<sup>1</sup>Корнеев С.В., <sup>2</sup>Дорошенко С.В., <sup>2</sup>Ширлин И.И.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, Россия;

<sup>2</sup>ООО «Газпромнефть-СМ», Москва, Россия;

ivan.shirlin@mail.ru

### Цель

Оценка точности измерения показателей работающего масла мобильным диагностическим оборудованием (инфракрасный спектрометр, рентген-флуоресцентный спектрометр, портативный вискозиметр) в сравнении со стационарными приборами для внедрения системы оперативного контроля состояния техники по показателям смазочного материала.

### Актуальность

Планово-предупредительная система технического обслуживания теряет свою эффективность – ситуация обусловлена совместным использованием смазочных материалов, рассчитанных на стандартные и увеличенные интервалы использования и стремлением автотранспортных предприятий к сокращению расходов на техническое обслуживание за счет увеличения межсервисных интервалов.

В сложившейся ситуации предприятия, эксплуатирующие автомобильную и специализированную технику, переходят от планово-предупредительной системы технического обслуживания к комбинированной, когда часть операций технического обслуживания проводится планово, с учетом фактического ресурса применяемых смазочных материалов.

Однако, увеличение интервалов замены приводит к сокращению количества проверок состояния узлов и агрегатов техники, реализуемых в процессе выполнения работ технического обслуживания, что снижает вероятность своевременного выявления скрытых неисправностей, влекущих нарушение работоспособности техники и, как следствие, снижают её надежность (рисунок 1).

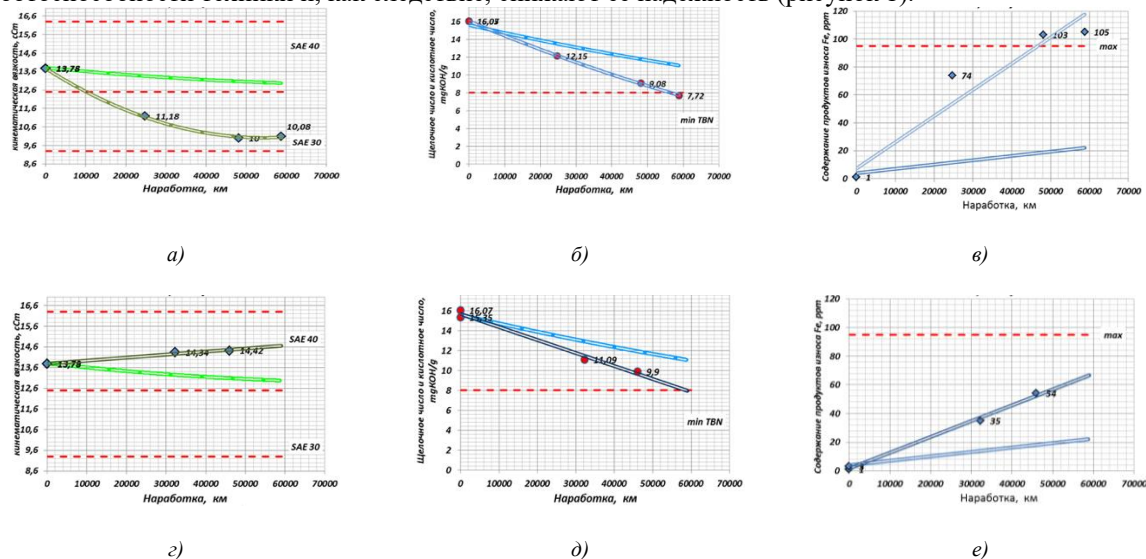


Рис. 1. Влияние отклонений в работе системы питания двигателя на изменение показателей работающего масла:

*a - в* – загрязнение моторного масла топливом (до 3 %); *г - е* – загрязнение моторного масла сажей (до 4,2%)

В данных условиях, для оперативного выявления возможных нарушений в работе систем и механизмов техники предлагается внедрение системы диагностики техники по параметрам работающего смазочного материала с применением мобильного диагностического оборудования.

Использование комплекта портативных приборов позволяет в течение 20-30 минут получить информацию о накоплении продуктов изнашивания и загрязнения, выявить критические изменения физико-химических показателей применяемого смазочного материала, тем самым предварительно установить возможные отклонения в работе узла и предотвратить его преждевременный отказ.

Однако, применение портативных приборов требует оценки точности измеренных показателей в сравнении с распространенными методами лабораторного контроля.

### Выводы:

1) Использование мобильного диагностического оборудования для оценки текущего состояния узлов и агрегатов техники позволяет оперативно и с достаточной точностью выявлять скрытые отклонения в работе систем и механизмов двигателей по параметрам работающего моторного масла.

2) Точность результатов определения основных параметров работающего смазочного материала сопоставима с точностью приборов стационарных лабораторий.

## Проблемы физико-математических и технических наук

Короткевич С.В.

РУП “Гомельэнерго”, Гомель, Беларусь

korotstv@tut.by

**Цель – Обоснование использования принципа наименьшего действия (ПНД) для описания процессов протекающих в пространственно-временном континууме и установление инвариантов кинетики поверхности разделов металлов.** В настоящее время в материаловедении, физике конденсированного состояния, триботехнике и др. отраслях знаний не применяется фундаментальный принцип, основанный на свойствах симметрии пространства и времени, а именно: принцип наименьшего действия или принцип Гамильтона [1, 2]. Все физико-химические процессы протекают в пространстве и времени, свойства которого должны отражаться и на этих процессах. Если это так, то должны существовать инварианты.

**Результаты и краткое обсуждение.** Выявлены основные фундаментальные закономерности формирования и кинетики деформационных дефектов, что определяет основные механизмы деформации при упрочнении и разрушении поверхности металлов при внешних воздействиях (прокатка, трибонагружение и др.), а именно:

- установлена обратная пропорциональная зависимость между плотностью дислокаций и интенсивностью разрушения поверхностного слоя никеля. Выполняется выражение [1]:

$$\rho \cdot I = const \quad (1)$$

где (1); где  $\rho$  – плотность дислокаций,  $I$  – объёмная интенсивность изнашивания,  $const \geq 0$ ;

- экспериментально установлено, что увеличение скорости упрочнения (коэффициент  $K_1$ ) обуславливает и увеличение скорости релаксации напряжений (коэффициент  $K_2$ ) в поверхностном слое никеля. Выполняется выражение [1]:

$$K_1/K_2 = const, \quad (2)$$

где  $K = \Delta H/\Delta t$  и  $0 \leq const \leq 1$ ;

- масштабная инвариантность локальной кривизны кристаллической решётки поликристаллического никеля на всех структурных уровнях деформации. Выполняется выражение [2]:

$$\chi_{ij}(10^{-n} \cdot x_1; 10^{-n} \cdot x_2; 10^{-n} \cdot x_3) = 10^n \chi_{ij}^0(x_1, x_2, x_3), \quad (3)$$

где  $x_i$  – координаты трёхмерного пространства,  $\chi_{ij}^0$  – тензор кривизны кристаллической решётки  $Ni$  в состоянии после отжига,  $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ;

- здесь необходимо добавить инвариант или условие сплошности материала, установленный В.Е. Паниным:

$$\sum_{i=1}^N Rot J_i = 0 \quad (4)$$

где  $J_i$  – потоки дефектов на  $i$ -м структурно-масштабном уровне;

- анализ экспериментальных данных показывает, что в области сильно неравновесной деформации, зернограничное скольжение определяет увеличение площади пористости материала и, как следствие, интенсивности его изнашивания. Выполняется выражение [3]:

$$\frac{I}{S} = const. \quad (5)$$

где  $I$  – объёмная интенсивность изнашивания,  $S$  – суммарная площадь пор;

- отношение регистрируемого контактного сопротивления ( $R_c$ ) к сопротивлению исходной металлической поверхности (без смазки и в начальный момент времени трибонагружения), с учётом оксидной плёнки ( $R_{ок}$ ), характеризует состояние поверхности раздела металлов (стали, чугун, бронза, благородные металлы). При этом выполняется выражение [3]:

$$\frac{R_c}{R_{ок}} = const. \quad (6)$$

где  $const$  в зависимости от режима трения намного больше единицы ( $\gg 1$ ), больше единицы ( $> 1$ ), равно единице ( $= 1$ ), меньше единицы ( $< 1$ ). Разработанный инвариантный критерий лежит в основе запатентованных способов оценки состояния поверхностей сопряжения опор качения и скольжения при эксплуатации, что позволяет на ранней стадии предотвращать наступление задира и схватывания.

Предложенный подход и установленные инварианты имеют фундаментальный характер, как для физико-математических, так и для технических наук. Последнее определяет их практическое приложение. Естественно предположить и наличие других инвариантов в различных областях естественных наук.

[1]. Korotkevich S.V. The Principle of Least Action and Invariants / S.V. Korotkevich // 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.

[2]. 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, p. 174–182.

[3]. Korotkevich, S.V. Hamilton's Principle and the Invariants / S.V. Korotkevich // Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration: proc. of International Conference, Beijing, PRC, China, 20 October 2023, Part 1: Participants' reports in English, p. 157–164.

## Влияние дисперсионной среды на трибологические свойства пластичных смазок на основе алкилфенолятов кальция

Курцева Е.И., Песковец А.В.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Одним из перспективных направлений является производство пластичных смазок, в качестве загустителя которых применяют высокощелочные присадки, а именно сульфонаты, салицилаты и алкилфеноляты кальция. Сочетание уникальных природных свойств получаемых смазок на основе алкилфенолятов кальция обусловлено их составом и упорядоченным структурным каркасом, состоящим из мицелл алкилфенолятов кальция, между которыми встраиваются молекулы базового масла за счет сил межмолекулярного взаимодействия. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния дисперсионных сред различной природы на эксплуатационные свойства алкилфенолятных смазок.

Для исследования были использованы следующие компоненты: масло И-40А, П-40, ПАО-40, VHVI-4, ПАО-4 и ПАБ в качестве дисперсионных сред, алкилфенолятная присадка К-38 и структурообразователи (уксусная кислота и вода).

Оценка эксплуатационных свойств всех приготовленных образцов по стандартным методикам ГОСТ: температура каплепадения ГОСТ 6793-74; пенетрация ГОСТ 5346-78; коллоидная стабильность ГОСТ 7142-74; предел прочности на сдвиг ГОСТ 7143-73; трибологические свойства на четырехшариковой машине трения ГОСТ 9490-75. Результаты исследования представлены в Таблице 1. Таблица 1 – Исследование влияния дисперсионной среды на эксплуатационные свойства алкилфенолятных пластичных смазок

Показатели	Дисперсионная среда образцов алкилфенолятной смазки					
	Масло И-40А	Масло П-40	Масло VHVI-4	Масло ПАО-4	Масло ПАО-40	ПАБ-С
Температура каплепадения, °С	>250	135	>250	>250	>250	170
Пенетрация, $\times 10^{-1}$ , мм	271	257	298	272	269	295
Предел прочности на сдвиг, Па	2000	2000	1880	1880	1440	1680
Коллоидная стабильность, %	0,95	0,98	0,52	0,52	0,86	1,65
Диаметр пятна износа, мм	0,53	0,56	0,52	0,56	0,53	0,62
Критическая нагрузка, Н	1381	1470	1235	1303	1303	1166
Нагрузка сваривания, Н	5508	4635	5204	5841	5841	5204

По полученным данным можно сделать следующие выводы:

1) За счет разного группового химического состава масел, применяемых в качестве дисперсионных сред, преобладают различные силы межмолекулярного взаимодействия между компонентами системы, что объясняет свойства полученных образцов. Оптимальными свойствами обладают образцы на основе масла И-40А и VHVI-4.

2) Образец смазки, приготовленной на ароматической основе ПАБ-С, обладает более низкими эксплуатационными свойствами, чем на парафиново-нафтенной основе масел ПАО-4 и ПАО-40, что объясняется наличием большого количества ароматических соединений.

3) Оценка трибологических свойств показала, что все полученные образцы обладают высоким уровнем противозадирных и противозадирных свойств вне зависимости от типа используемой дисперсионной среды.

Дальнейшие исследования направлены на изучение влияния типа дисперсионной фазы, присадок и наполнителей на трибологические свойства алкилфенолятных пластичных смазок.

## Влияние износостойких покрытий на стойкость металлорежущего инструмента

Кушинир А.П.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
email: gurinmura@yandex.ru

**Цель работы:** Повышение долговечности металлорежущего инструмента.

**Объект исследования** - токарные резцы с многогранными неперетачиваемыми пластинами из твердого сплава при разных покрытиях, как однослойных (TiN, TiC, MoN), так и многослойных (TiN+MoN, TiCN).

Метод нанесения покрытия нитридами титана - путем ионно-плазменной конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ) на установке Булат 3М, а также путем реактивной электронно-плазменной конденсации вещества (РЭП). Покрытия из карбидов титана осуществлялось способом термодиффузионного насыщения (ДТ) и осаждения из газовой фазы (ГТ).

На рис. 1 приведены результаты износа по задней грани поверхности пластин Т14К8 без покрытия и с покрытием в зависимости от времени работы при следующих режимах: скорость резания 144 м/мин, подача 0,6 мм/об, глубина резания 1,5 мм.

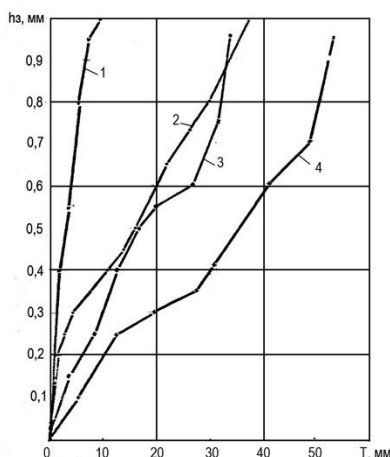


Рис. 1. Зависимость износа по задней поверхности резца от времени: 1)  $r = 0,8$  мм без покрытия; 2)  $r = 0,8$  мм с покрытием TiN; 3)  $r = 1,2$  мм без покрытия; 4)  $r = 1,2$  мм с покрытием TiN

На рис. 2 приведены результаты износа по задней грани поверхности пластин Т15К6 без покрытия и с покрытием в зависимости от времени работы при следующих режимах: скорость резания 143 м/мин, подача 0,57 мм/об, глубина резания 1,5 мм, обрабатываемый материал Сталь 40Х (НВ 269...302).

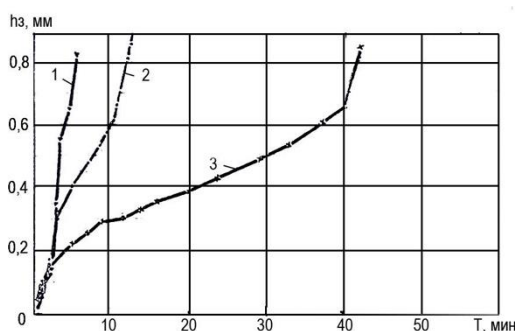


Рис. 2. Зависимость износа по задней поверхности резца от времени: 1) без покрытия; 2) с покрытием TiN; 3) с покрытием TiN+MoN

Проведенные эксперименты позволили выявить области, в которых влияние износостойких покрытий почти не оказывает влияния, а также режимы, в которых повышение долговечности составляет более 800 %.

- [1]. Haynes, William M., ed. (2016). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (97th ed.). CRC Press. p. 4.92. ISBN 9781498754293.
- [2]. Tunes, Matheus A.; da Silva, Felipe C.; Camara, Osmane; Schön, Claudio G.; Sagás, Julio C.; Fontana, Luis C.; et al. (December 2018). "Energetic particle irradiation study of TiN coatings: are these films appropriate for accident tolerant fuels?" (PDF). *Journal of Nuclear Materials*. 512: 239–245. Bibcode:2018JNuM..512..239T. doi:10.1016/j.jnucmat.2018.10.013.
- [3]. Alat, Ece; Motta, Arthur T.; Comstock, Robert J.; Partezana, Jonna M.; Wolfe, Douglas E. (September 2016). "Multilayer (TiN, TiAlN) ceramic coatings for nuclear fuel cladding". *Journal of Nuclear Materials*. 478: 236–244. Bibcode:2016JNuM..478..236A. doi:10.1016/j.jnucmat.2016.05.021.
- [4]. Du, Jingzhen; Seed, John A.; Berryman, Victoria E. J.; Kaltsoyannis, Nikolas; Adams, Ralph W.; Lee, Daniel; Liddle, Stephen T. (2021). "Exceptional uranium(VI)-nitride triple bond covalency from  $^{15}\text{N}$  nuclear magnetic resonance spectroscopy and quantum chemical analysis". *Nat. Commun.* 12 (1): 5649. Bibcode:2021NatCo..12.5649D. doi:10.1038/s41467-021-25863-2.

## Исследование триботехнических свойств высокоэнтропийных покрытий для металлорежущего инструмента.

*Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Колосова Н.В., Оплеснин С.С.*

МГТУ «СТАНКИН», г.Москва

Современное машиностроительное производство, особенно авиационно-космическая отрасль при оснащении ее дорогостоящим высокоскоростным оборудованием в части металлорежущих станков с различными системами управления (ЧПУ, АдСУ, НСУ и др.) имеет низкий показатель эффективности их эксплуатации из-за низкой износостойкости металлорежущего инструмента. При существовании различных методов улучшения триботехнических и эксплуатационных характеристик режущего инструмента в настоящее время, по-прежнему наибольшее внимание уделяется вопросам разработки и применения инновационных многослойных наноструктурированных износостойких покрытий, которые в настоящее время получают по традиционным методам и технологиям, т.е. на основе использования одного или большого количества монокатодов на современных уникальных дорогостоящих установках с минимальным коэффициентом эффективной загрузки и с большим объемом подпрограмм по запуску для работы. В настоящее время все большее развитие получает порошковая металлургия, которая всегда определяла уровень технического прогресса всего машиностроения, так как обеспечивает разработку и внедрение инновационных материалов и изделий, в большинстве случаев которых нельзя получить путем применения традиционно используемых технологий. Значительная привлекательность этой технологии за последние десятилетия определяются следующими основными преимуществами: есть возможность спекания заготовки с большим количеством составляющих элементов при малых их дозировке и меньших размерах испытываемых образцов; позволяют получать материалы с принципиально новыми свойствами и кристаллической структурой (от микроуровня до наноуровня); возможность придания уникальной структуры с целью обеспечения значительного улучшения физико-механических и функциональных характеристик изготавливаемой детали; возможны создание и производство нового порошкового материала и изделия с особыми запрограммированными параметрами, которые невозможно обеспечить, используя традиционные технологии коим можно отнести высокоэнтропийные сплавы. Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является исследование триботехнических свойств высокоэнтропийных покрытий. На первом этапе для получения катодов-мишеней необходимо было проведение работ по разработке технологии получения высокоэнтропийных катодов-мишеней, включающие подготовку исходного материала (обеспечение процентного состава элементов, необходимой дисперсности и т.д.); выбор оборудования для размельчения исходных порошков и спекания катодов-мишеней; учитывая специфику дальнейшего функционального назначения полученных катодов-мишеней для нанесения износостойких покрытий, разработать параметры для их оценки, методику и оборудования для их контроля. На втором этапе наиболее важные работы связанные уже по нанесению и испытанию полученных покрытий. Полученные высокоэнтропийные катоды – мишени были использованы для нанесения износостойких покрытий на модернизированной установке «ННВ – 6.6 - И1» с магнетронной системой, дополнительно оснащенной системами магнитно-дуговой фильтрации с системой контроля температуры, на инденторы из инструментального твердого сплава ВК10 ОМ, используемых как основа для металлорежущего инструмента. Для исследования и оценки триботехнических свойств были проведены серии экспериментальных исследований на двух функционально разных типах трибметра: «Nanovea» TRB при возвратно - поступательном движении полусферического индентора с высокоэнтропийным покрытием и такого же типа индентора на высокотемпературной адгезионной установке при вращательном движении индентора при переменных: температуры в зоне контакта (путем применения электроконтактного прогрева) и переменных нагрузок (загрузки рычажного механизма разновесками). Данный метод представляет физическую модель, которая практически соответствует реальным условиям трению и износу идентичному лезвийной обработки резанием. В основе модели, цилиндрический индентор со сферической поверхностью на концах из исследуемого твердого сплава ВК10 ОМ (инструментальный материал) с разными испытываемыми покрытиями сжимается между двумя цилиндрическими образцами с высокой точностью из обрабатываемого материала (хромоникелевые сплавы - ЭП99; ЭК61) с параллельной и отполированной поверхностями. Индентор под нагрузкой  $N$  вращается вокруг собственной оси и при этом осуществляется регистрация необходимого усилия для вращательного движения. Температурный режим в контактной зоне образцов из обрабатываемого материала с индентором обеспечивается в широком диапазоне вариаций (0 - 1300°C). По результатам триботехнических испытаний установлено, что наилучшие показатели с точки зрения: адгезии износостойкого покрытия на поверхность инструментального материала; адгезионного составляющего коэффициента трения между обрабатываемым и инструментальным материалом с износостойким покрытием из высокоэнтропийного катода-мишени при трении, а также совместности пары трения «инструмент с покрытием и обрабатываемый материал» обеспечивается покрытиями:  $(Al_{20}-Ti_{20}-Zr_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Nb_{15})$  и  $(Al_{20}-Hf_{15}-Mo_{15}-Co_{15}-Ta_{10}-W_{10}-Zr_{15})$ .

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>.

## Износостойкость инновационных наноструктурированных покрытий для обработки титановых сплавов

*Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Оплеснин С.С., Тюрина Ю.А.*

МГТУ «СТАНКИН», г.Москва

В условиях современного машиностроительного производства все острее встает вопрос разработки и внедрения в промышленность материалов с уникальными прочностными и эксплуатационными характеристиками, к которым относятся титановые сплавы. Общеизвестны уникальные свойства титановых сплавов к которым относятся: высокие прочностные свойства при растяжении и сжатии; надежная работоспособность - как при высоких, так и при низких температурах (криогенных); меньшая плотность в сравнении с другими и как результат легче других металлов почти на 45%; высокие показатели по пластичности и ударной вязкости при высокотемпературном нагреве и знакопеременном нагружении; низкие значения по теплопроводности и электропроводности; наноструктурирование путем проведения дополнительной технологической обработки и другие. При наличии множества превосходящих технических свойств большинство титановых сплавов относятся к труднообрабатываемым материалам с позиции лезвийной обработки резанием, требующего существенного расхода режущего инструмента; низкие показатели качества обработанных поверхностей; низкая производительность с высокими показателями по затратам на процесс. И это связано с их особенным физико – техническим свойством - низкой теплопроводностью, что приводит к большому тепловому напряжению контактной зоны «инструмент - деталь» при обработке резанием. Известно, что технологичность и эффективность механообрабатывающего производства в целом определяется уровнем инструментального обеспечения. Степень обеспеченности современного металлообрабатывающего производства высокоэффективным металлорежущим инструментом оказывает существенное инновационное влияние на индустриальный рост машиностроения, основанный на опережающих подходах к разработке и внедрению новых материалов и технологий; определяет динамику импортных и экспортных поставок и в целом уровень импортозависимости; приводит к пониманию о межведомственном и общемашиностроительном характере проблемы и актуальности их решения.

Цель работы: повышение эффективности обработки титановых сплавов резанием при обеспечении соответствующих критериев качества поверхностного слоя.

Для проведения экспериментальных износостойкостных испытаний режущего инструмента были нанесены различные виды композиционных наноструктурированных многослойных покрытий на основе нитридов и с добавлением диборидов и т.д. на различных модернизированных установках отечественного производства на базе ННВ - 6.6 - И1, таки и импортных серии «Platit». Износостойкостные испытания твердосплавного инструмента BK10 OM при фрезеровании концевыми фрезами диаметром  $d=12$  мм с нанесенными инновационными покрытиями титановых сплавов – BT 18Y, BT 41 осуществлялись на вертикально - фрезерных станках: «Knuth WF 4.1» и «BM 127M» в широком диапазоне изменения элементов режима резания:  $n = 1500 - 3000$  об/мин;  $S_{мин} = 70 - 150$  мм/мин;  $a_e = 2 - 5$  мм и  $a_p = 0,5 - 2$  мм. При этом для понимания и объяснения обрабатываемости титановых сплавов проводились исследования температуры в зоне резания и составляющих усилия резания.

По результатам экспериментальных испытаний по критериям: износостойкость; наибольшая критическая длина пути резания при величине критического износа ( $h_3 = 0,3$  мм) и наибольшего периода стойкости фрезы обеспечивалась покрытиями: по титановому сплаву BT 18Y - «nACo3+TiB2» улучшение в 1,8 раза; «nACRo+TiB2» в 1,6 раза и «(CrAlSi) + DLC»; титановому сплаву BT 41 - «nACo3+TiB2» улучшение в 1,4 раза; «nACRo+TiB2» в 1,5 раза и «(CrAlSi) + DLC» в 1,3 раза.

По температурным испытаниям: наименьшая величина температуры резания: «nACRo+TiB2» на 19% и 23% в соответствии титановым сплавам BT 18Y и BT 41. Анализ температурной зависимости и теплоемкости при фрезеровании титановых сплавов показал, что BT 18Y менее теплоемкий по сравнению с BT 41.

Результаты силовых экспериментов показали, что: наименьшая величина составляющих усилия резания установлена покрытием «nACo3+TiB2» как для титанового сплава BT 18Y, так и сплава BT 41 при этом соответственно на 22 и 28% меньше по сравнению с обработкой с покрытием без дополнительного слоя «(ZrCrAl)N»; величина силовой нагруженности контактных процессов при обработке BT 18Y меньше по сравнению с BT 41 на 1,3 – 1,5 раза.

По результатам исследования шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании с различными покрытиями установлено, что наилучшие показатели обеспечиваются при применении следующих покрытий соответственно: nACo3+TiB2; nACRo+TiB2 и (CrAlSi)N + DLC.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>.

## Повышение эффективности лезвийной обработки резанием хромоникелевых сплавов

*Мигранов М.Ш., Репин Д.С., Колосов А.Ю., Тюрина Ю.А.*  
МГТУ «СТАНКИН», г.Москва

Известно, что одним из наиболее эффективных методов и направлений повышения эффективности лезвийной обработки резанием и в целом улучшения условий работы обрабатываемого инструмента, по-прежнему остается создание и широкое внедрение инновационных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Согласно многочисленным публикациям и собственным экспериментальным исследованиям наибольшей перспективностью для решения вышеназванной проблемы обладают СОЖ, полученные путем введения в товарную марку смазочного материала малой дозы уникальных многофункциональных присадок с различными по природе и физико-химическими свойствами. Такие многофункциональные полимерные присадки обладают высокой проникающей способностью и возможностью многостороннего воздействия на триботехнические и температурно-силовые условия, а также на контактные процессы в зоне резания металла. Вместе с тем, такие многофункциональные присадки чувствительны и способны улучшать свои эксплуатационные свойства и интенсифицируют процесс образования различных химических активированных элементов в объеме самого смазочного материала под воздействием физико – технической энергии. Составляющие СОЖ под воздействием энергии (активации) формируют активированные атомы, ионы, свободные радикалы, ион - радикалы, что в целом полученная дополнительная энергия приводит к метастабильному состоянию. СОЖ в метастабильном состоянии способствует ослаблению и частичному нарушению внутримолекулярных связей, что приводит к деструкции состава смазочного материала. В дальнейшем происходит активация отдельно взятого атома, радикала или группы на контактных поверхностях металлорежущего инструмента и обрабатываемой детали. Такие активированные элементы формируют в контактной зоне особые пленки с экранирующим эффектом от адгезионного взаимодействия, а также смазывающее – охлаждающим эффектом для снижения температурно - силовых условий при лезвийной обработке резанием.

Цель работы заключается в разработке и применении активированных СОЖ с кислородсодержащими полимерными присадками для улучшения условий лезвийной обработки точением сплавов из хрома и никеля и показателей качества обработанной поверхности за счет снижения температурно – силовой нагруженности зоны резания и повышения износостойкости режущего инструмента.

В работе изучены теоретико – экспериментальные предпосылки повышения эффективности лезвийной обработки хромоникелевых сплавов и проведены серии экспериментальных исследований при продольном точении с различными СОЖ (товарные «Укринол» и МР 3; серии Эфтол+ПВС и др.) на токарно-винторезном станке 16К20Т1 с ЧПУ твердосплавными резцами ВК8 и ВК10 ОМ хромоникелевых сплавов (12Х18Н10Т и 15Х18Н12СЧТЮ) широко используемых в деталях тяжело нагруженных высокотемпературных трибосопрежений. При проведении комплекса натурных экспериментальных исследований осуществлялись: температурные испытания на основе метода естественных термопар, а также с использованием высокочувствительного пирометра. При этом для определения составляющих усилия резания использовался комплекс современного оборудования и аппаратуры, состоящего из универсального динамометра УДМ-600 с усилительным устройством 4АНЧ-22, подключенного к ПЭВМ и шлейфовому светолучевому осциллографу типа Н-117 для осуществления записи выходных данных и визуализации регистрируемых параметров. Для тарирования динамометра УДМ-600 использовался образцовый переносной динамометр системы Токаря, изготавливаемый в соответствии с ГОСТ 9500-75. Оценка параметров напряженно-деформированного поверхностного слоя обрабатываемой детали при обработке резанием осуществлялась путем определения коэффициента усадки стружки на основе весового метода с использованием аналитических весов WA -32. Были проведены серии износостойкостных испытаний резцов при точении хромоникелевых сплавов. Анализ полученных экспериментальных данных показал и подтвердил, что высота фаски износа по задней грани главной режущей кромки является определяющим, имеет наименьшую изменчивость результатов измерения износа и полностью характеризует трение и изнашивание, а также при постоянстве геометрии режущего клина в целом отражает размерную стойкость инструмента. Для измерения средней величины фаски износа по задней грани резца ( $h_z$ , мм) использовались: механический микроскоп «МИР-2М» с отсчетной насадкой «МОВ-15» с точностью измерения до 0,002 мм и универсальный моторизированный стереомикроскоп «Carl Zeiss Stereo Discovery V12» с системой визуализации на базе видеокамеры «Zeiss AxioCam 503 Color» 3 мпа. Износостойкостные испытания режущего инструмента проводились до достижения величины износа по задней поверхности  $h_z = 0,3$  мм. По результатам анализа температурно-силовых и износостойкостных зависимостей при различных режимах обработки установлено, что для всех исследованных материалов использование активированной СОЖ с добавкой кислородсодержащей полимерной присадки при точении позволяет повысить износостойкость резцов в среднем на 25 – 40% по сравнению с товарными СОЖ.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>.

# Исследование износостойкости модифицированных квазикристаллами МДО-покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве В95

Морозов А.В.

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия  
morozovalexei@mail.ru

## Цель

Продемонстрировать результаты экспериментального исследования трибологических свойств оксидных слоев, сформированных микродуговым оксидированием на алюминиевом сплаве В95 в модифицированном наночастицами квазикристаллов электролите.

## Материалы и методы

МДО-покрытия были получены методом микродугового оксидирования, при этом для их модификации базовый электролит (2 г/л КОН + 9 г/л Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O + 6 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>) наполнялся квазикристаллами (Al (45,42 мас.ч.) - Cu (32,9 мас.ч.) - Fe (21,68 мас.ч.) в разной концентрации, а именно: 5, 10 и 15 г/л (см. табл. 1). В качестве подложки использовался высокопрочный алюминиевый сплав В95. Образцы диски с нанесенным МДО-покрытием имели диаметр 24 мм и толщину 8 мм. В деталях процесс формирования МДО-покрытий с разной концентрацией квазикристаллов описан в работе [1].

Трибологические свойства МДО-покрытий определялись по схеме контакта шар-диск согласно стандарту ASTM G99 на УМТ-3 трибометре (SETR (Td Bruker), США). Шар диаметром 10 мм из карбида вольфрама (твердость HRc = 72) прижимался с постоянной нагрузкой P = 10 Н к вращающемуся со скоростью V = 0,2 м/с образцу диска. Радиус дорожки трения составлял R = 9 мм, а путь трения S был задан согласно стандарту равным 1 км. Все испытания были выполнены при комнатной температуре T ~ 23 °C и относительной влажности воздуха 45-50%. Перед испытаниями поверхности образцов и шариков очищались этиловым спиртом. Датчики трибометра позволяют прецизионно измерять нормальную нагрузку и силу трения, что позволяет рассчитывать коэффициент трения как отношение силы трения к нормальной нагрузке. Износ МДО-покрытий измерялся как объем удаленного материала ΔV (рис. 1) на бесконтактном профилометре S Neox (Sensofar, Испания). Коэффициент износостойкости K определялся как отношение изношенного объема к нормальной нагрузке и пути трения, то есть  $K = \Delta V / (P \cdot S)$ . По три теста было сделано для каждого покрытия.

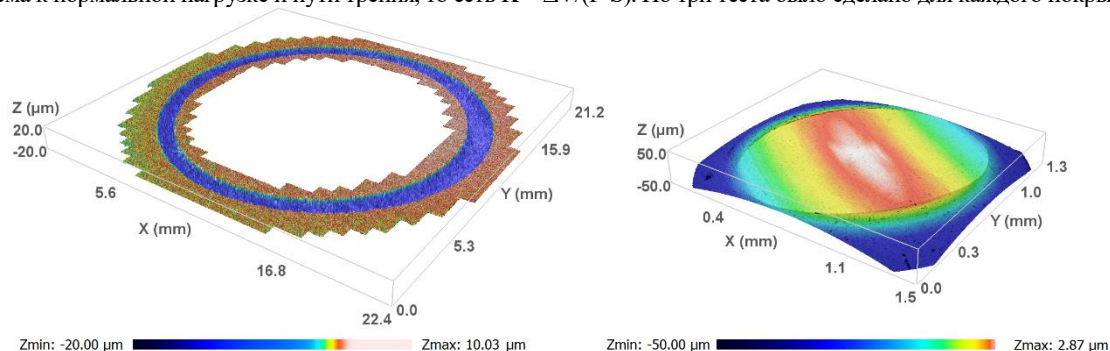


Рис. 1. Типовые 3D профилограммы (образец 3) трэка износа диска (слева) и пятно износа на шарике (справа).

## Результаты

Результаты выполненных измерений трибологических свойств модифицированных МДО-покрытий представлены в табл. 1. Анализируя данные, можно сделать вывод: введение малого количества (5 г/л) Al-Cu-Fe квазикристаллов в МДО-покрытие оптимально для снижения его износа. Следует отметить, что на процессы трения и износа существенное влияние оказывает трибопленка, которая состоит в том числе и из продуктов износа шарика. Механизмом изнашивания покрытий является хрупкое разрушение на микроуровне.

Таблица 1. Обозначения образцов и полученные результаты

Код образца	Концентрация квазикристаллов в электролите, г/л	Толщина покрытия, мкм	Коэффициент трения	Коэффициент износостойкости, мм <sup>3</sup> /Нм	Твердость, Hv
1	0	95	1,10 ± 0,03	8,7 ± 0,04 × 10 <sup>-6</sup>	365±50
2	5	100	1,03 ± 0,08	2,6 ± 0,05 × 10 <sup>-6</sup>	300±30
3	10	115	1,13 ± 0,04	9,6 ± 1,80 × 10 <sup>-6</sup>	240±30
4	15	120	1,17 ± 0,06	6,2 ± 0,01 × 10 <sup>-6</sup>	250±50
5	втерты	100	0,92 ± 0,03	0,5±0,002 × 10 <sup>-6</sup>	350±50

Автор выражает благодарность своим коллегам проф. Е.В. Торской, проф. В.Н. Малышеву и с.н.с. О.О. Щербакковой. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки №123021700050-1 (FFGN-2023-0005).

[1]. Torskaya, E.V.; Morozov, A.V.; Malyshev, V.N.; Shcherbakova, O.O. Processing and Tribological Properties of PEO Coatings on AlZn5.5MgCu Aluminium Alloy with Incorporated Al-Cu-Fe Quasicrystals. Ceramics 2023, 6, 0–13.



## Химия присадок и проблемы экологии

Паренаго О.П.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук*

Приведены основные типы синтетических присадок к смазочным материалам, оказывающих наибольшее влияние на трибологические характеристики в процессах граничного трения металлических по-верхностей. В качестве примера представлена традиционная полифункциональная присадка – диалкил(арил)-дитиофосфат цинка, (ДФ-Зп), проявляющая высокую эффективность в качестве ингибитора окисления смазочных масел, а также превосходные противоизносные и антикоррозионные свойства [1].

Рассмотрены главные экологические проблемы, связанные с негативным влиянием на человека и ок-ружающую среду в результате широкого использования горюче-смазочных материалов, в частности, присадок к смазочным маслам для автотранспорта [2]. Несмотря на отличные эксплуатационные качества ДТФ-Зп в последние десятилетия опубликован целый ряд работ, показывающих отрицательное воздействие химических элементов в составе молекулы этой присадки (атомы фтора, серы и металла) на функционирование некоторых узлов в устройствах автомобилей, призванных очищать выхлопные газы от токсичных примесей (катали-тические дожигатели выхлопных газов, сажевый фильтр, устройство для циркуляции выхлопных газов) [3-5]. В связи с этим в химии присадок к смазочным материалам возникло и получило развитие направление Low(Zero)SAPS, т.е. низкое (или нулевое) содержание сульфатной золы (sulphated ash), фосфора (phosphorus) и серы (sulphur) [6]. Вместе с тем, несмотря на острую критику ДТФ-Зп производство и потребление этой присадки продолжается в ряде стран (в нашей стране присадка ДФ-11) ввиду относительной простоты синтеза и достаточно низкой стоимости.

Однако, в последние годы появились работы по синтезу и применению противоизносных присадок к смазочным маслам на основе соединений с пониженным содержанием (или их отсутствием) экологически опасных элементов в их составе [6,7]. Среди них следует отметить производные диалкилдитиокарбаминовых кислот (ДТК), не включающих атомы фосфора и металлов [8], или азотсодержащие гетероциклические соединения [9], а также основания Шиффа [10]. Среди последних работ можно указать на синтез и противо-износные свойства метиловых эфиров ДТК [11] и на ее производные, содержащие четвертичные аммонийные соли [12]. В заключение выделим работу по синтезу новой полифункциональной присадки к смазочным мас-лам на основе серосодержащего производного 2,6-диметилфенола, проявляющей высокие антиокисли-тельные, противоизносные и антикоррозионные свойства и не содержащей атомов фосфора и металла [13,14].

### Литература

1. A.M. Barnes, K.D. Bartle, V.R.A. Thibon. / Trib. Intern. 2001. V. 34. P. 389–395
2. G.C. Koltsakis, A.M. Stamatelos. / Progress in Energy Combustion Science. 1997. V. 23. P 1-39
3. K. Inoue, T. Kurahashi, T. Negishi, T. Akiyama, K. Ashimura, K. Tasaka. / SAE Tech. 1992. Paper 920654
4. S. Kumar, V. Ferrari, P.L. Burk, M. Deeba, J. Rogalo. / SAE Tech. Paper. 2003-01-3735. 2003
5. J. Franz, J. Schmidt, C.Schoen, M. Harpersheid, S. Eckhoff, M. Roesch, J. Leyrer. eactivation of TWC as a function of oil ash accumulation – a parameter study / SAE Tech. Paper. 2005-01-1097. 2005
6. H. Spikes. Low- and zero-sulphated ash, phosphorus and sulphur anti-wear additives for engine oils / Lubrication Science. 2008. V. 20. P. 103-136
7. O.P. Parenago, E.Yu. Oganeseva, A.S. Lyadov, A.A. Sharaeva. / Russian Journal of Applied Chemistry. 2020. V. 93. N 11. P. 1629-1637
8. Akin M., Tekin N. // Petr. Chem. 2016. V. 56. P. 175-180
9. J. Li, B. Fan, T. Ren, Y. Zhao. / Trib. Intern. 2015. Vol. 88. P. 1-7
10. R. B. Rastogi, J. L. Maurya, V. Jaiswal. / Trib. Trans. 2013. Vol. 56. P. 592-606
11. Э.Ю. Оганесова, А.С. Лядов, Е.Г. Бордубанова, О.П. Паренаго / Нефтехимия. 2022. Т. 62. № 4. С. 561-567
12. А.С. Лядов, Э.Ю. Оганесова, А.А. Кочубеев, О.П. Паренаго / Трение и износ. 2023, Т. 44. № 1. С. 20-25
13. Е.Г. Бордубанова, Э.Ю. Оганесова, А.С. Лядов, О.П. Паренаго. Новая полифункциональная присадка к смазочным маслам. Заявка на патент №, от
14. Е.Г. Бордубанова, Э.Ю. Оганесова, А.С. Лядов, О.П. Паренаго. Докл. АН. 2023. Т. 512. С. 59-64

## Влияние состава дисперсионной среды на свойства алкилсалицилатных пластичных смазок

*Песковец А.В., Суровцев А.С., Подстяжонко Е.И.  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина*

Одним из перспективных видов пластичных смазок являются смазки на основе алкилсалицилатов кальция благодаря ряду преимуществ: отличная стабильность при высоких температурах, широкий диапазон рабочих температур, высокая адгезия к металлическим поверхностям, высокая устойчивость к окислению и коррозии. Однако, важно учитывать состав дисперсионной среды, поскольку от него немало зависит формирование структурного каркаса смазки в процессе производства, и, в дальнейшем, ее работоспособность в различных интервалах температур и нагрузок. Исходя из этого, цель работы состоит в изучении влияния состава дисперсионной среды на эксплуатационные, в том числе трибологические, свойства алкилсалицилатных пластичных смазок.

В основе технологии приготовления алкилсалицилатных пластичных смазок лежит технология получения сульфонатных смазок, разработанная на кафедре Химии и технологии смазочных материалов и химмотологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. В качестве загустителя использовали алкилсалицилатную присадку «Детерсол Д-140», в качестве структурообразователей – уксусную кислоту и воду. Исследовано влияние следующих дисперсионных сред: И-50А, VHVI-4, ПАО-4 и ПАБ-С. Для всех полученных образцов были определены следующие показатели: температура каплепадения (ГОСТ 6793), коллоидная стабильность (ГОСТ 7142), предел прочности (ГОСТ 7143) и трибологические характеристики (ГОСТ 9490). Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики полученных образцов на разных дисперсионных средах

Наименование показателя	Дисперсионная среда			
	Нефтяная		Синтетическая	
	И-50А	VHVI-4	ПАО-4	ПАБ-С
Температура каплепадения, °С	>250	135	184	>250
Коллоидная стабильность, % масс	0,16	1,46	6,05	3,89
Предел прочности при 20°С, Па	640	363	135	460
Диаметр пятна износа при 20 кгс, мм	0,40	0,57	0,47	0,36
Критическая нагрузка, Н	735	617	588	617
Нагрузка сваривания, Н	2765	2608	2451	2451

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. При использовании масла И-50А, содержащего различные группы углеводородов, в том числе ароматические, образуется более прочная структура пластичной смазки, что подтверждается высокой температурой каплепадения образца. Вместе с тем, использование указанного масла в качестве дисперсионной среды позволяет получить продукт с хорошими противозносными свойствами, по сравнению со смазкой на основе масла VHVI-4, практически не содержащего ароматические углеводороды.

2. Анализ образцов на синтетических дисперсионных средах позволяет заключить, что, вероятно, на прочность структурного каркаса алкилсалицилатной смазки огромное влияние оказывают ароматические углеводороды, о чем свидетельствует высокий уровень свойств образца, приготовленного на ПАБ-С. Использование маловязкого полиальфаолефинового масла нежелательно, поскольку такой образец не отвечает требованиям к высокотемпературным смазкам. При этом противозносные свойства образца, приготовленного на основе ПАБ-С, также на высоком уровне.

Таким образом, стоит отметить, что при производстве алкилсалицилатных смазок в качестве дисперсионной среды предпочтительно использовать базовые масла, содержащие достаточное количество ароматических углеводородов. Их наличие способствует образованию сил индукционного взаимодействия в системе смазки, которые на порядок сильнее остальных типов дисперсионных сил, и обеспечивает высокий уровень эксплуатационных свойств пластичной смазки.

## Некоторые закономерности накопления повреждений при различных видах циклического нагружения и в гигацикловой области

Петрова И.М.

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

impetr@mail.ru

В элементах конструкций (автомобилей, турбин, аппаратов химической промышленности и т.п.), работающих в течение длительного времени или при высокочастотных нагрузках таких как элементы конструкций когда диапазон срока службы находится в области усталостной долговечности за пределами  $10^7$  циклов, а действующие напряжения ниже традиционного предела усталости, соответствующего долговечности  $2 \cdot 10^6 - 10^7$  циклов нагружения меняется механизм разрушения и развития трещин. При этом следует учесть возможное появление в элементах конструкций пластических деформаций при пусках и остановках, влияние трения и износа в элементах трибосопряжений и еще целого ряда факторов, которые приводят к деградации эксплуатационных характеристик технических систем. При этом требуется определить причины достижения объектом наблюдения предельного состояния по различным критериям, ориентируясь на степень их влияния на накопление повреждений в рассматриваемом объекте. В работе [1] был предложен критерий, учитывающий влияние динамического нагружения и трения на накопление повреждений в поверхности деталей, который записывался в виде

$$D = D_N + D_e + D_{II} \quad (1)$$

где  $D_N$  отражает накопление повреждений при динамическом нагружении и упругом деформировании, соответствующее многоциклового усталости;  $D_e$  - накопление повреждений при упруго пластических деформаций - малоциклового усталости,  $D_{II}$  - накопление повреждений от износа при трении. Величины  $D_N$ ,  $D_e$ ,  $D_{II}$  при эксплуатации на различных режимах определяют на основании линейного суммирования повреждений. Для их определения необходимо располагать кривыми усталости

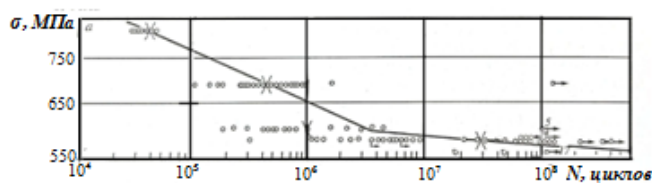


Рис.1. Кривая усталости высокопрочной Cr-Mo стали

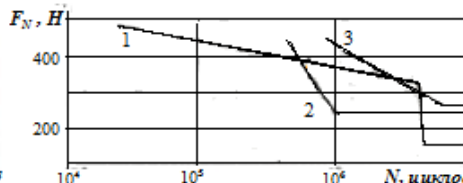


Рис.2 Кривые фрикционной (1 - без изгиба) и фрикционной механической усталости с изгибом (2-  $\sigma_n = 160$  МПа) и (3-  $\sigma_n = 50$  МПа)

На рис. 1 представлена кривая усталости высокопрочной Cr-Mo стали, полученная по путем испытаний до базы  $5 \cdot 10^8$  циклов [2]. Для описания подобных кривых усталости, включающих с целью гигацикловую усталость предложено [3] использовать уравнение кривой усталости в форме Вейбулла.

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{-1} + A [ \lg(N + N_1) ]^{-\alpha}, \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}$  - отношение амплитуды напряжений к пределу выносливости для базы испытаний  $10^7$  циклов,  $\bar{\sigma}_{-1}$  - отношение предела выносливости для неограниченной базы к пределу выносливости для базы испытаний  $10^7$  циклов,  $N$ ,  $A$ ,  $\alpha$  - параметры уравнения обобщенной кривой усталости.

При трении нагрузка, циклически действующая на поверхность, даже если она достаточно мала, вызывает в поверхностном слое сжимающие и растягивающие напряжения, что может привести к усталостному разрушению поверхности [4]. Усталостный характер накопления повреждений и изменения коэффициента трения, зафиксированный при испытании на моделях фрикционного контакта, подтверждают экспериментально полученные в работе [13], приведенные на рис. в координатах контактная нагрузка - число циклов до наступления предельного состояния вкладыша по критерию износа. На рис. видна область малоциклового усталости I, примерно до  $4,2 \cdot 10^6$  чисел циклов, II - область многоциклового усталости, расположенной почти вертикально, откуда можно сделать вывод, что наибольшее влияние на накопление усталостных повреждений трение оказывает на накопление повреждений при малоциклового усталости.

1. Петрова И.М., Москвитин Г.В., Гриб В.В.. Влияние износа на накопление усталостных повреждений// Заводская лаборатория. 2006.

11. С. 49-52.

2. Захарова Т.П. К вопросу о статистической природе усталостной повреждаемости. // Проблемы прочности 1974а № 6 с.53-59

3. Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В. Усталость легких конструкционных сплавов М. Машиностроение 1973. 317с

4. Крагельский И.В., Фляйшер Г., Комбалов В.С., Тум Х. Расчет трения, износа и долговечности с позиций молекулярно-механической, усталостной и энергетической теорий. // Проблемы машиностроения и автоматизации. №12, 1986, с. 13-25

5. А.В.Богданович, О.М.Еловой, И.Н.Лис, Ю.А.Головченко. Экспериментальное исследование закономерностей обратного эффекта

сталь 45 - силумин при фрикционно-механической усталости. Трибофатика Труды VI МСТФ 2010, часть 1, с. 527-53

## Обеспечение равномерности изнашиваемости поверхностей трения деталей плазменным нанесением и упрочнением покрытий переменного состава

Плахотин А. А., Кадырметов А. М. ([kadyrmetov.a@mail.ru](mailto:kadyrmetov.a@mail.ru)), Попов Д. А. ([qaz.7@mail.ru](mailto:qaz.7@mail.ru))

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»

Целью работы является решение проблемы обеспечения равномерности изнашивания поверхностей трения деталей (на примере цилиндров ДВС) и режущих кромок лезвий рабочих органов машин при неравномерно распределенных по поверхностям изнашивающих воздействиях. Решение проблемы предлагается с помощью плазменного нанесения и упрочнения покрытий переменного состава с распределением в них высокотвердых составляющих, соответствующем неравномерному распределению интенсивностей изнашивающих воздействий [1].

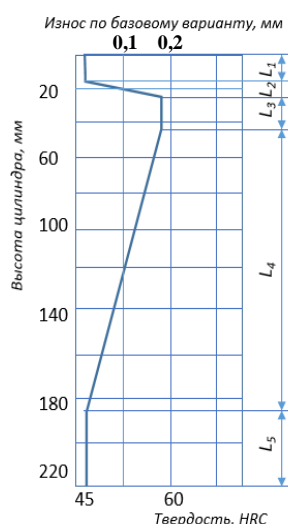
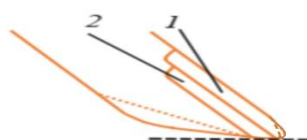


Рис. 1. Кусочно-линейное приближение распределения износа поверхности цилиндра ДВС



$H_1 < H_2$ ; штриховые линии - линии износа

Рис. 2. Схема самозатачивания при изнашивании кромки лезвия лемеха

покрытием ПГСР-4, включающим в себя карбиды вольфрама или кремния, показали повышение износостойкости в  $\sim 1,4$  раза при добавлении в порошок карбидов кремния в количестве 70 %, и в  $\sim 1,55$  раз - при добавлении карбидов вольфрама в количестве 70 %. При этом осуществлялось самозатачивание лезвия, профиль сечения лезвия не менялся (угол между кромками лезвия не менялся), что обеспечивало стабильность тяговых усилий движителя рабочих органов и сокращение энергопотерь.

Управление составляющими комбинированного процесса плазменного нанесения и упрочнения покрытий переменного состава с использованием модуляции параметров позволяет обеспечивать равномерный профиль изнашивания трибоповерхностей при неравномерных поверхностных изнашивающих воздействиях и, тем самым, повысить заданную долговечность их изнашивания. Предложенный метод позволяет при этом экономить износостойкий дорогостоящий материал покрытий.

[1] Плахотин, А.А. Упрочнение изнашиваемых поверхностей деталей лесных машин плазменным нанесением и упрочнением покрытий переменного состава / А.А. Плахотин, А.М. Кадырметов, Д.А. Попов // Воронежский научно-технический вестник. – 2023. – Т. 3, № 3 (45). – С. 34-47. Режим доступа : <http://vestnikvglta.ru/gallery/34-47.pdf> – DOI : 10.34220/2311-8873-2023-3-3-34-47.

[2] Кадырметов, А. М. Оборудование для плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров [Текст] / А. М. Кадырметов, Станчев Д. И., Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №11(71). – С. 41-48.

[3] Кадырметов, А. М. Технологическое обеспечение восстановления типовых деталей ДВС плазменным нанесением и упрочнением покрытий / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, В. Н. Бухтояров, К. А. Радыгин, А. К. Андрущенко, И. А. Кичатов // Воронежский научно-технический вестник. – 2020. – №2 (32). – С. 177-190. Режим доступа : <http://vestnikvglta.ru/gallery/177-190.pdf>.

Распределение упрочняющей доли порошка  $\phi_{уп}$  по длине цилиндра  $x$  должно быть пропорциональным интенсивности поверхностного распределения изнашивающего воздействия (рис. 1), что позволяет обеспечить поверхностную равномерность изнашивания. Скорость перемещения плазматрона  $V_{нап}$  по длине цилиндра выбирается из условия обеспечения цилиндричности поверхности цилиндра. Процесс нанесения покрытия включает операции подготовки поверхности под плазменное напыление, плазменное напыление покрытия, плазменное оплавление покрытия, шлифование, хонингование и финишное плазменное упрочнение.

Упрочняющая фаза на режущих кромках лезвийных инструментов наносится одним или двумя слоями, расположенными на задней (наплавка первого рода) или передней поверхности лезвия (наплавка второго рода, рис. 2). Процесс нанесения покрытия в данном случае включает операции подготовки поверхности под наплавку, плазменную наплавку, шлифование, финишную электромеханическую обработку.

Процессы плазменного нанесения покрытия на гильзы цилиндров осуществлялись одним из эффективных способов с использованием модуляции мощностей косвенной и прямой дуг [2,3] на примере использования самофлюсующихся никель-хромовых порошков с добавками кремния и бора с разным соотношением компонентов, с разной твердостью и износостойкостью, отличающимися, соответственно, по твердости на 15-22 %, по износостойкости - на 16-25 %.

Результаты исследований интенсивности изнашивания образцов, имитирующих работу лезвийных рабочих органов из стали Л53, и образцов с двухслойным самозатачивающимся никель-хромовым

## **Упрочнение резьбы легкосплавных насосно-компрессорных труб формированием МДО-покрытий и применением экологических смазочных материалов**

*Почес Н. С., Малышев В. Н.*

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия  
nikitapoches@gmail.com

### **Цель**

Целью работы являлось повышение износостойкости и антифрикционных свойств резьбовых соединений легкосплавных насосно-компрессорных труб (НКТ) посредством формирования покрытий методом микродугового оксидирования (МДО) в условиях работы в парах трения разного материального исполнения и применением экологических смазочных материалов.

### **Введение**

Насосно-компрессорные трубы являются наиболее распространенным видом трубной продукции в нефтегазовой отрасли. Эксплуатация колонн НКТ в нефтегазовой отрасли сопровождается многочисленными операциями свинчивания-развинчивания и требует применения специальных резьбовых смазок на минеральной основе. Наиболее распространенными причинами аварий стальных НКТ является коррозия, износ резьбы и усталость металла. Уже после 5-7 циклов свинчивания-развинчивания НКТ требуется проводить ремонт резьбовой части трубы.

Применение легкосплавных насосно-компрессорных труб (ЛНКТ) из алюминиевых сплавов является перспективным решением одновременно нескольких проблем. Во-первых, алюминиевые ЛНКТ имеют высокую коррозионную стойкость, в особенности при добыче нефти и газа в осложненных условиях агрессивной среды, наличия сероводорода и углекислого газа. Во-вторых, ЛНКТ позволяют снизить вес лифтовых колонн, что предопределяет снижение расходов на спускоподъемные операции. Однако, несмотря на все преимущества алюминиевых ЛНКТ их существенным недостатком является низкая износостойкость резьбовых соединений. Упрочнение резьбы формированием МДО-покрытия является перспективным методом решения данной проблемы.

В то же время, работоспособность резьбового соединения НКТ во многом зависит от вклада в процесс свинчивания-развинчивания смазочного материала. В настоящее время для сборки НКТ применяют смазки на минеральной основе, период биологического разложения которых весьма значителен, что усиливает экологическую нагрузку, учитывая какой объем смазки идет для операций свинчивания-развинчивания. Поэтому использование смазочных материалов на экологически безопасной основе, с периодом биоразложения менее года, обеспечит работоспособность резьбового соединения и улучшит экологическую обстановку.

### **Материалы и методы**

В работе использовалась современная инструментальная база, включающая как стандартизированное оборудование – машина трения SRV (испытания по стандарту ASTM G133-02 по схеме «шар-диск»), машина трения оригинальной конструкции РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (испытания по стандарту ASTM G99-04 по схеме «штифт-диск»), машина трения МТМ-393 (испытания по схеме «кольцо-кольцо»), так и специализированное и стендовое оборудование. Общая методология исследований заключалась в поэтапном изучении триботехнических характеристик МДО-покрытий, сформированных на сплавах Д16 и В95, при трении в экологически безопасных смазочных материалах, таких как полиолефины (ПАО), диизотридецил адипат (ДИТА), полиэтиленгликоль (ПЭГ), силиконовое (кремневое) масло и др.. В работе использовали системный подход, включавший экспериментальное определение триботехнических характеристик, получение на их основе расчетных зависимостей и последующую проверку их адекватности путем проведения модельных и натуральных экспериментов. Применяли следующие методы исследования: растровая электронная микроскопия, EBSD-анализ, 3D-микроскопия, а также некоторые другие известные методы материаловедения и физической химии, регламентированные соответствующими государственными стандартами.

### **Результаты и обсуждение**

Проведенные исследования показали возможность и целесообразность использования в узлах трения с МДО-покрытиями экологических смазочных материалов. Полученные в работе зависимости изменений коэффициента трения и скорости изнашивания от приложенного контактного давления описываются экспоненциальными функциями для всех исследованных пар трения и имеют тенденцию к уменьшению коэффициента трения и увеличению скорости изнашивания при повышении контактного давления.

В процессе выполнения работы был разработан метод на основе технологии микродугового оксидирования для формирования новых керамо-полимерных покрытий, которые состоят из оксидной матрицы и частиц политетрафторэтилена. Проведенные испытания на трение и изнашивание показали, что новые-керамо-полимерные покрытия в сравнении с «традиционными» МДО-покрытиями имеют повышенные триботехнические характеристики в парах трения как по стали, так и по одноименной поверхности.

### **Выводы**

Использование экологических смазочных материалов в сочетании с упрочнением резьбы легкосплавных НКТ модифицированными МДО-покрытиями позволяет повысить их износостойкость.

# Исследование момента сопротивления подшипника с перекрестными роликами при работе в вакууме

<sup>1</sup>Прожега М.В., <sup>2</sup>Попорецкий Д.И., <sup>2</sup>Реицков Е.О., <sup>1</sup>Смирнов Н.Н., <sup>1</sup>Константинов Е.О., <sup>1</sup>Коровушкин В.В.

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
maksim.prozhega@yandex.ru

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

**Цель.** Определение момента сопротивления подшипника с перекрестными роликами при эксплуатации в условиях повышенных и отрицательных температур.

**Введение.** К преимуществам подшипников качения с перекрестными роликами (далее ПКПР) относят компактность, высокую жесткость и несущую способность при одновременном воздействии осевой и радиальной нагрузки [1-2].

ПКПР представляет собой роликовый подшипник, у которого ряды тел качения – цилиндрических роликов расположены под углом 90°. Ролики перемещаются по специальным пазам колец подшипника, а ряды разделены сепаратором, который не дает телам качения смещаться и устраняет трения между роликами [2].

ПКПР применяются в узлах, обеспечивающих точное перемещение рабочих органов станков и оборудования, в робототехнике, в прецизионном медицинском и научном оборудовании, в аэрокосмических аппаратах [1-2].

В рассмотренных нами работах отсутствуют экспериментальные исследования влияния температуры на момент сопротивления подшипника, что особенно важно при работе космических аппаратов в экстремальных условиях (вакуум, повышенная или криогенная температура) [1-5].

Подшипники качения работают со смазочным материалом, поэтому момент сопротивления подшипника зависит не только от конструктивных особенностей и характера нагружения, но и от характеристик смазочного материала, которые зависят от условий окружающей среды. В экстремальных условиях используются твердые и пластичные смазочные материалы (ПСМ) [4-6].

**Условия испытаний.** В настоящей работе определяли момент сопротивления и коэффициент трения ПКПР при различных условиях испытаний (табл. 1) и количестве смазочного материала – ВНИИ НП-284 (АМЕТИСТ) ТУ 38.1011029-2009. Используемый ПСМ предназначен для работы в вакууме и в диапазоне температуры окружающей среды от –110 до +200 °С. Состав АМЕТИСТ представляет собой композицию из основы перфторполиэфира и органо-силикагелевого загустителя.

## Результаты

В результате испытаний получили значение момента сопротивления подшипника при различных условиях эксплуатации (рис. 1).

Таблица 1. Режимы испытаний

Параметр	Значение		
Температура, °С	-40	+25	+100
Давление, Па	$10^5$	$<10^{-3}$	
Осевая сила, Н	500	800	
Масса ПСМ, мг	60	226	

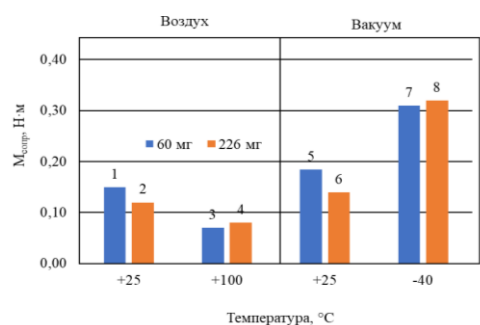


Рис. 1. Момент сопротивления ПКПР

При испытаниях в вакууме коэффициент трения и момент сопротивления подшипника выше, чем при испытаниях при нормальном атмосферном давлении. Максимальное значение исследуемых параметров (момент сопротивления 0,32 и коэффициент трения 0,018) наблюдали в вакууме ( $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па) при отрицательной температуре (-40 °С), минимальное (0,07 и ,004 соответственно) – при атмосферном давлении и температуре +100 °С.

[1]. So Young Hwang, Na Ra Lee and Naksoo Kim Experiment and Numerical Study of Wear in Cross Roller Thrust Bearings. Lubricants, 2015. Vol. 3, p. 447-458. DOI:10.3390/lubricants3020447.

[2]. Quagliato L. et al. Run-out based crossed roller bearing life prediction by utilization of accelerated testing approach and FE numerical models. International Journal of Mechanical Sciences, 2017. Vol. 130, p. 99-110. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.06.006.

[3]. Wikstrom V., Larsson R. and Hlglund E. A Theoretical Analysis of Shear Stresses and Roller Slip in Rolling Bearings During Low-Temperature Starting. Elastohydrodynamics, 96. Sweden, p. 423- 444.

[4]. Prozhega MV et al. Research of the Lifetime and Lubricant Properties of Greases for Rolling Bearings Operating in Space Conditions. Journal of Friction and Wear, 2021. Vol. 42, Iss. 6, p. 431-437. DOI: 10.3103/S1068366621060088.

[5]. Prozhega MV et al. Estimation of MoS2 Coating Performance on Bronze and Steel in Vacuum at High Temperatures. Coatings, 2022. Vol. 12, Issue 2, Article Number 125. DOI:10.3390/coatings12020125.

[6]. Гриб В.В., Буяновский И.А. Смазочные материалы и смазка деталей машин: Учебное пособие. МАДИ(ГТУ) – М., 2008. 80с.

# Исследование трибологических свойств полимеров для аддитивных технологий в вакууме

<sup>1</sup>Прожега М.В., <sup>2</sup>Попорецкий Д.И., <sup>1</sup>Смирнов Н.Н., <sup>1</sup>Константинов Е.О., <sup>1</sup>Коровушкин В.В.

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

[maksim.prozhega@yandex.ru](mailto:maksim.prozhega@yandex.ru)

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

**Цель.** Определение трибологических свойств в условиях вакуума полимерных материалов, используемых для изготовления узлов трения методами аддитивных технологий.

## Введение

3D печать широко применяется в различных отраслях промышленности. Возможности аддитивных технологий по созданию сложных форм и внутренней структуры материала обеспечивают их конкурентное преимущество по сравнению с традиционными методами обработки. Детали современных космических спутников, летательных аппаратов марсо- и луноходов часто изготавливаются на 3D принтере [1-2].

Возможность автоматизации и автономной работы оборудования для аддитивного производства позволяют использовать их для изготовления деталей непосредственно на месте эксплуатации, во время следования космического аппарата или на других планетах [3].

Самым распространенным методом аддитивных технологий является метод послойного нанесения полимерными материалами. Трение полимеров отличается от трения металлических материалов, из которых традиционно изготавливаются детали, работающие в трибосистемах [3-5].

Для оценки возможности применения полимерных материалов, которые используются для изготовления деталей методами аддитивных технологий, в узлах трения, эксплуатирующихся в космических условиях, необходимо проведение исследований трибологических свойств этих материалов в вакууме и при различной температуре.

## Материалы и методы

В настоящей работе определяли коэффициент трения полимерных материалов в вакууме при комнатной и повышенной (до 110 °С) температуре в соответствии со стандартом ASTM G133 по схеме штифт-плоскость при возвратно-поступательном движении образцов. Исследуемые материалы – пластики для 3D печати: SBS, ABS, PETG, PLA, NC (NYLON SUPER CARBON 2).

## Результаты

Значение коэффициента трения в установившемся режиме при испытаниях в вакууме при комнатной температуре приведено в табл. 1, динамика изменения коэффициента трения показана на рис. 1.

Таблица 1. Коэффициент трения в установившемся режиме

№	Материал	Коэффициент трения
1	SBS	$0,73 \pm 0,13$
2	ABS	$0,12 \pm 0,03$
3	PETG	$0,10 \pm 0,01$
4	PLA	$0,45 \pm 0,09$
5	NC	$0,08 \pm 0,003$
6	SBS	$0,73 \pm 0,13$

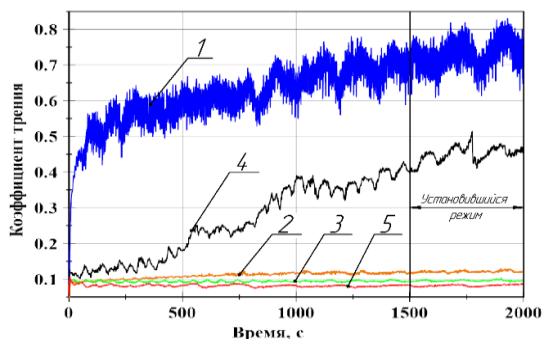


Рис. 1. Изменение коэффициента трения во время испытаний

В вакууме при комнатной температуре материал NC показал наименьший коэффициент трения — 0,08. При повышении температуры до 130 °С пластик NC сохраняет свои эксплуатационные свойства.

До 80 °С материал PETG сохраняет низкий коэффициент трения не более 0,10.

Материал ABS сохраняет работоспособность до 110 °С, при этом значение коэффициента трения увеличивается с 0,12 (при комнатной температуре) до 0,29 (при 110 °С).

До 70 °С материал PLA показывает стабильное значение коэффициента трения от 0,45 (при комнатной температуре) до 0,40 (при 70 °С).

Наибольший коэффициент трения при испытаниях показал материал SBS от 0,73 (при комнатной температуре) до 0,65 (при 80 °С).

[1]. Attaran M. The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing over Traditional Manufacturing. Business Horizons, 2017. Vol. 60, no. 5, p. 677–688

[2]. John Ryan C. Dizon et al. Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers. Additive Manufacturing, 2018. Vol. 20, p. 44–67

[3]. Prozhega M.V. et al. Frictional Properties of 3D Printing Polymers in Vacuum. Journal of Friction and Wear, 2020. Vol. 41, No. 6, p. 565-570. DOI: 10.3103/S1068366620060173.

[4]. Francis Froes, Rodney Boyer eds. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry. Elsevier, 2019.

[5]. Daminabo S. C. et al. Fused Deposition Modeling-Based Additive Manufacturing (3D Printing): Techniques for Polymer Material Systems. Materials Today Chemistry, 2020. Vol. 16, 100248.

## Анализ путей снижения потерь мощности на трение в перспективных несмазываемых ступенях роторно-пластинчатого типа

*Райковский Н.А., Калашников А.М., Садвакасов Д.Х.*

Омский государственный технический университет, Омск, Россия;

kalashnikov\_omgtu@mail.ru

Данная работа посвящена решению актуальной проблемы снижения потерь энергии на трение в несмазываемых компрессорных машинах роторно-пластинчатого типа. Большие потери энергии на трение в паре трения “цилиндр-уплотнительные пластины”, которые для несмазываемого исполнения машины могут достигать 60% от подводимой мощности, существенно ограничивают область режимных параметров работы и не позволяют обеспечить высокие значения КПД таких машин [1, 2].

Для решения данной проблемы авторами предложено изменить трибологическую схему компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа [3].

В ходе сравнительных экспериментальных исследований определены потери мощности на трение для традиционного и нового исполнений трибологической схемы ступени роторно-пластинчатого типа. Установлено, что потери мощности на трение для нового исполнения компрессорной ступени снижаются в среднем от 4 до 10 раз, в сравнении с традиционным исполнением, что определяется быстроходностью машины и материалом уплотнительных пластин. Результаты термометрирования стенки цилиндра также подтверждают энергоэффективность нового исполнения трибологической схемы.

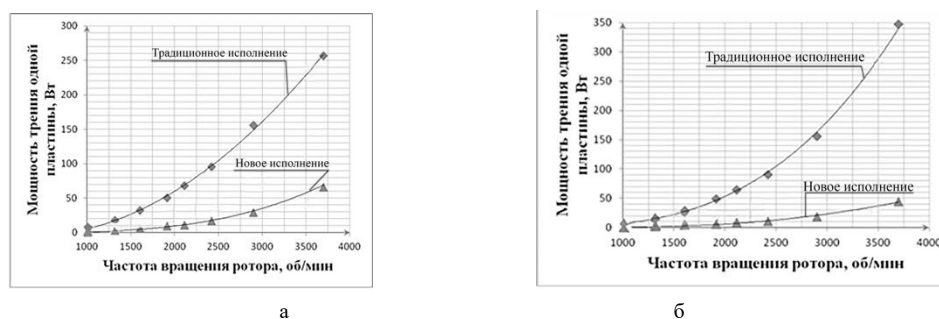


Рис. 1. Зависимость потерь мощности на механическое трение для одной пластины в имитаторе несмазываемой ступени роторно-пластинчатого типа от частоты вращения ротора: а – материал пластины АГ-1500СО5; б – материал пластины – изостатический графит

Была выведена система уравнений, определяющая нагрузочно-скоростные условия работы трибосопряжений, на базе которой составлена математическая модель компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа. Теоретические исследования показали, что имеется принципиальная возможность создания быстроходных несмазываемых компрессорных ступеней роторно-пластинчатого типа, имеющих сравнительно высокий механический КПД, превышающий 90%.

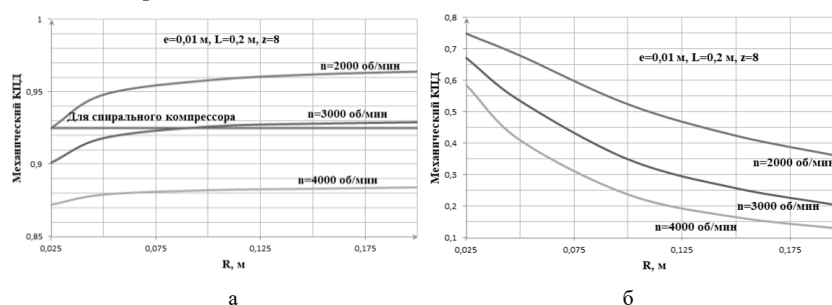


Рис. 2. Зависимость механического КПД несмазываемой ступени роторно-пластинчатого типа от радиуса цилиндра: а – новое исполнение; б – традиционное исполнение

При этом значения нагрузочно-скоростных режимов работы трибосопряжений уменьшились: в трибосопряжении “пластина-цилиндр” – скорость относительно скольжения уменьшилась в среднем в 10 раз, а в трибосопряжении “пластина-ротор” – нагрузки снизились до 40%, что позволяет применять полимерные композиционные материалы для изготовления уплотнительных пластин и прогнозировать существенное увеличение ресурса их работы.

- [1]. A Study on Novel High Efficiency Vane Compressor/ Y. Hu, J. Xu, P. Wan, F. Luo, F. Wu, L. Ren. – Текст : электронный // International compressor engineering conference : conference proceeding (July 9-12, 2018). – 2018. – P. 2601.
- [2]. Davim, J.P.Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface atLong dry sliding / J.P. Davim, R. Cardoso. – DOI:10.1016/j.wear.2008.11.003// Wear. – 2009. –Vol.266(7). –P. 795–799.
- [3]. Патент № 2801244 Российская Федерация, МПК F01C 1/344 (2006.01), F04C 2/344 (2006.01). Ротационно-пластинчатая машина : № 2023103213 : заявл. 14.02.2023 : опубл. 03.08.2023 / Н. А. Райковский, А. М. Калашников ; заявитель Омский гос. технолог. ун-т. – 3 с. : ил.



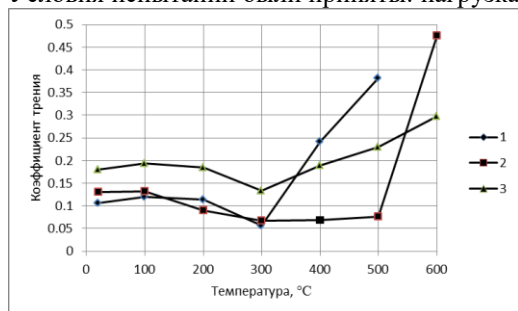
## Углеродосодержащие материалы для пар трения аппарата Венера

Рощин М.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
roschin50@yandex.ru

В космической технике применяются специализированные износостойкие антифрикционные материалы и покрытия, которые могут работать в условиях открытого космического пространства и (или) условиях атмосфер исследуемых планет. Смазки и антифрикционные материалы применяют для обеспечения нормальной работы внешнего оборудования, приборов, систем жизнеобеспечения космических аппаратов (КА) [1]. Пары трения агрегатов и узлов КА, как правило, работают при температурах от минус 150 до плюс 500 °С, низком давлении воздуха от 0,1 МПа и до глубокого космического вакуума, работа в среде атмосферы планет, так к примеру, на поверхности планеты Венера давление достигает 9210 кПа, температура – плюс 462,1 °С [2,3]. В связи с этим возникает задача подбора материалов узлов трения КА, осуществляющих спуск в атмосфере, посадку и работу на поверхности Венеры, которые могут функционировать при температурах выше плюс 450 °С, что может быть обеспечено только за счёт применения самосмазывающихся антифрикционных материалов. В качестве антифрикционных самосмазывающихся материалов можно рассмотреть углеродосодержащие композиционные материалы. Целью работы являлось исследование антифрикционных свойств материалов пар трения, перспективных для обеспечения работы механизмов при высокой температуре на поверхности Венеры.

При исследовании трибологических свойств использовался материал «Углекон-Т», «Хардкарб-ТПГ», «Углекон-Т»+Se-ПТФЭ. Эксперимент насыщения поверхности трения материала «Углекон-Т» проводился в защитной камере при откачке воздуха до давления 13 Па при температуре 805 °С, материал для насыщения использовался селен и политетрафторэтилен (Se-ПТФЭ). Ответная пара трения с выбранными материалами использовалась сталь 40Х13. При испытаниях был использован высокотемпературный стенд ВТМТ-1000, на котором реализована схема испытаний – «диск-палец». Условия испытаний были приняты: нагрузка 1,0 МПа, скорость 0,16 м/с, температура 20...600 °С [4]. По



результатам трибологических испытаний определена зависимость коэффициента трения от температуры в диапазоне 20...600 °С, рис.1.

Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от температуры при скорости 0,16 м/с и нагрузке 1,0 МПа материалов: 1-«Углекон-Т», 2-«Углекон-Т»+Se-ПТФЭ, 3-«Хардкарб-ТПГ».

Изменение коэффициента трения при температуре +20...+300 °С образцов 1, 2 и 3 незначительные, коэффициент трения находится в диапазоне 0,06–0,19. При увеличении температуры более 300 °С коэффициент

трения материала «Углекон-Т» резко возрастает. Материал «Углекон-Т» при испытании при высокой температуре в атмосферных условиях в присутствии кислорода испытывает сильное окисление, которое вызывает быструю деградацию поверхности трения. Модифицированная поверхность трения материала «Углекон-Т» антифрикционным составом Se-ПТФЭ получила новые свойства, которые подтверждены в результате эксперимента. Обработанная поверхность трения в парах Se-ПТФЭ менее восприимчива к воздействию кислорода при высокой температуре. Модифицированная поверхность до температуры 500 °С имеет низкий коэффициент трения 0,08. Материал «Хардкарб-ТПГ» работоспособен при температуре 20...500 °С, коэффициент трения составляет 0,18...0,23, который не превышает значение 0,3.

**Выводы.** Улучшение антифрикционных свойства поверхности трения материала «Углекон-Т» в паре со сталью 40Х13 достигнуто при обработке поверхности материала «Углекон-Т» в парах селена и политетрафторэтилена. Насыщенная поверхность трения антифрикционным составом Se-ПТФЭ имеет низкий коэффициент трения до температуры 500 °С, который расположен в диапазоне 0,07–0,13. При нагрузке 1,0 МПа, скорости скольжения 0,16 м/с и температуре 500 °С коэффициент трения обработанной поверхности меньше в 5 раз, чем не обработанной. При рабочей температуре 400...500 °С, нагрузке 1,0 МПа и скорости 0,16 изменение коэффициента трения материала «Хардкарб-ТПГ» находится в диапазоне 0,19–0,23.

[1]. Гришин С.А., Захаров Ю.В., Заширинский С.А., Лошаков В.А. и др. Метод моделирования посадки аппарата на поверхность Марса на динамическом стенде // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2020. № 1. С. 62–67.

[2]. Ярош В.М., Моисеев А.А., Броневец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны // Трение и износ. 2003. Т. 24, № 6. С. 626–635.

[3]. Basilevsky, Alexandr T.; Head, James W. (2003). «The surface of Venus». Reports on Progress in Physics 66 (10): 1699–1734. DOI:10.1088/0034-4885/66/10/R04.

[4]. Roshchin M.N. High-temperature installation for testing composite ceramic materials on the friction and wear behavior Journal of Physics: Conference Series 1515 042050 (2020).

## Условия работы высокооборотного упорного подшипника скольжения

Славский И.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
spl-igor@yandex.ru

При эксплуатации в экстремальных условиях работоспособность новой техники обеспечивается конструктивными особенностями поверхностей трения и применением новых перспективных материалов. Условия работы, которые можно отнести к экстремальным, возникают в крупногабаритных узлах трения, работающие при высоких скоростях скольжения и нагрузках.

В данной работе объектом исследований являются упорные подшипники главных циркуляционных насосов атомных реакторов (рис.1).

Главные циркуляционные насосы предназначены для отвода тепла от активной зоны реактора и передачи его воде второго контура в барабанах-сепараторах (одноконтурные АЭС с реактором РБМК) и в парогенераторах (двухконтурные АЭС с реакторами ВВЭР). В качестве ГЦН на АЭС с водным теплоносителем применяются насосы с уплотнением вала и выносным электродвигателем. Проточная часть состоит из подвода, выполненного в виде 90°-ного колена (на рисунке не показан) и прямолинейного участка, рабочего колеса одностороннего входа, консольно- расположенного на валу, и направляющего аппарата, состоящего из нескольких частей и крепящегося к сферическому корпусу насоса.

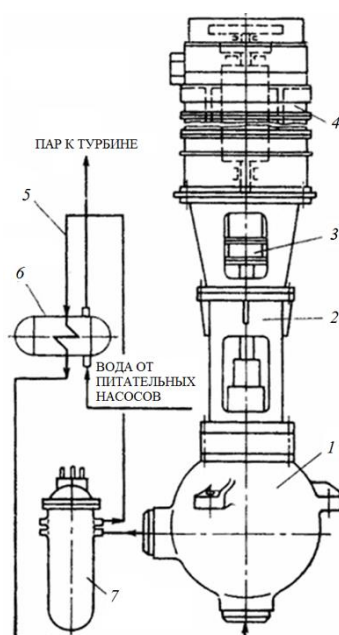


Рис. 1. Главный циркуляционный насосный агрегат двухконтурной АЭС с реактором ВВЭР-1000: 1 - насос, 2 – цилиндрическая рама, 3 - зубчатая муфта, 4- электродвигатель, 5- первый контур, 6 – парогенератор, 7 – реактор ВВЭР-1000

В верхней части корпуса устанавливается крышка, в которой размещается система уплотнения вала и нижний опорный подшипник. Система уплотнения вала насоса состоит из нескольких ступеней механических торцовых уплотнений, к которым от внешней системы подается чистая холодная запирающая вода с давлением, превышающим давление теплоносителя первого контура.

Опоры ротора насоса — подшипники скольжения. Нижний опорный гидродинамический подшипник работает на холодном теплоносителе. Верхний опорно-упорный гидродинамический подшипник работает на масле от индивидуальной маслоустановки.

Между опорно-упорным подшипником и системой уплотнения вала расположена жесткая соединительная муфта с проставкой, позволяющей производить замену узла уплотнения без демонтажа электродвигателя. Насос лапами корпуса опирается на фундамент через подвижные шаровые опоры, обеспечивающие перемещение насоса при температурных изменениях размеров трубопроводов в процессе разогрева и расхолаживания.

В связи с тем, что подшипники в циркуляционных насосах имеют размеры порядка метров, трибологические исследования таких узлов трения, как правило, проводятся на модельных образцах. [1-3]

[1]. Будов В.М. Насосы АЭС. -М.: Энергоатомиздат, 1986. - 408с

[2]. Шелегов А.С., Лескин С.Т., Слободчук В.И. Насосное оборудование АЭС: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 348с

[3]. Черемисинов Е.М., Славский И.С. Разработка и оптимизация высокооборотных нагруженных осевых опор с плавающими секторами погружных лопастных насосов. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 1. С. 16-22. DOI: 10.52261/02346206\_2023\_1\_16

## Трение и износ наноструктурных материалов

Столяров В.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
vlstol@mail.ru

Трибологическое поведение материалов является одним из многих откликов твердого тела на внешнее воздействие, которое представляет важный научный и практический интерес [1]. Научное значение данной темы связано с пониманием механизмов износа и возможностью его прогнозирования при длительной эксплуатации. Практическая важность экспериментального исследования износа предполагает разработку научных принципов повышения износостойкости, включая требования к структуре материала, контактной поверхности и ее механическим свойствам.

В этой связи данная работа посвящена обзору структурных факторов, влияющих на трение материалов – чистых металлов и сплавов. Среди чистых металлов, как объектов без фазовых превращений при комнатной и умеренно повышенной температурах, рассматриваются медь, никель, алюминий и титан. Как пример более сложных объектов, рассмотрены сплавы на основе титана (интерметаллидное соединение с памятью формы TiNi) и алюминия (силумин Al-Si). Особое внимание сфокусировано на влиянии размера зерен в широком диапазоне, как одного из наиболее важных структурных параметров. При этом акцент сделан на материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой (с размером зерен в интервале 0.1-1 мкм) (рис.1), полученных интенсивной пластической деформацией методом равноканального углового прессования (РКУП) или электропластической деформацией с применением импульсного тока.

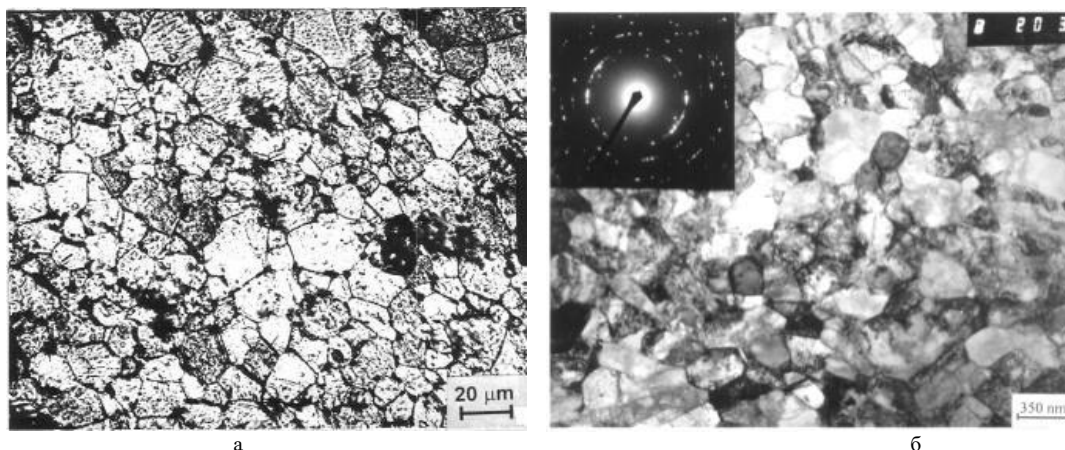


Рис.1. Микроструктура титана в крупнозернистом (а) и ультрамелкозернистом (б) состояниях

В обзоре кроме классической схемы трения, в которой индентор на контактной поверхности осуществляет макроперемещения, рассматривается схема с амплитудой микроперемещения менее 0.1 мкм, соответствующая особому случаю трения на микроконтактах, называемому фреттинг-износом. Литературные данные свидетельствуют, что в случае фреттинг-трения сопутствующие явления фреттинг-усталости и фреттинг-коррозии изменяют известные зависимости между прочностью, твердостью и износом и приводят к ускоренному разрушению.

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредотачиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты изнашивания не могут выйти из зоны контакта, в результате чего возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл.

Процесс трения скольжения УМЗ материалов на микроконтактах в условиях фреттинг-износа, высоких напряжений (близких к напряжению течения), повышенной температуры и интенсивной пластической деформации контактного 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 и даже аморфизацию. Предполагается, что подобные изменения структуры при длительном воздействии практически не зависят от исходного состояния и определяются только внешними параметрами процесса [1].

[1]. В.Н. Лясников и др., под ред. Д.Л. Мерсона. Перспективные материалы: учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2013. Т. 5. 422с.

# Исследование трибологических свойств пакетов присадок российского и зарубежного производства для турбинных масел температурным методом

<sup>1</sup>Стрельникова С.С., <sup>2</sup>Яковлева В.А., <sup>1\*</sup>Самусенко В.Д., <sup>1</sup>Буяновский И.А., <sup>2</sup>Крайнева А.А.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

samusenkovd@gmail.com

<sup>2</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

Политико-экономическая ситуация последних лет вызвала потребность в отечественных аналогах, способных заменить импортные смазочные материалы, поэтому проведение исследований, направленных на создание, производство российских пакетов присадок, является актуальной задачей. В частности, такая потребность существует при создании высококачественных турбинных масел, для надежной и эффективной эксплуатации турбоагрегатов и компрессорного оборудования.

**Цель.** Сравнительная оценка температурной стойкости и противоизносных свойств турбинных масел, включающих пакеты присадок российского и зарубежного производства.

## Исследуемые объекты

Эксплуатационные свойства турбинных масел зависят от основы масла и состава комплекса функциональных присадок [1-2]. Правильный подбор базового масла и композиции присадок обеспечивает эффективную работу турбинного масла в условиях воздействия высоких температур и нагрузок в течении длительного времени. При производстве премиальных турбинных масел зачастую используются высококачественные базовые масла III группы – VHVI (Very High Viscosity Index), имеющие хорошие вязкостно-температурные свойства и низкую испаряемость [3]. Именно данная основа VHVI-6 ( $\nu_{100} = 6 \text{ мм}^2/\text{с}$ ) использовалась в описываемой работе.

В настоящее время широкое применение в турбинных маслах нашли пакеты присадок компании BASF – Irgalube 2030A и Irgalube 2050, содержащие композицию из беззольных присадок, антиоксидантов, ингибиторов коррозии и деактиваторов металлов (без пеногасителей и демульгаторов) [4]. В качестве примера российского пакета присадок была взята композиция присадок, содержащая 0,8-1,0 % масс. антиокислительной присадки Агидол-1; 0,01-0,03% масс. ингибитора коррозии В-15/41; 0,01-0,07% масс. демульгатора Дипроксамин-157 и 0,01-0,05 % масс. деактиватора металла Irgamet 39 [5]. Присадки добавлялись в базовое масло в концентрации 0,45 % масс.

## Результаты и их обсуждение

Для оценки трибологических показателей исследуемых композиций использовался температурный метод оценки смазочной способности (ГОСТ 23.221-84) на четырехшариковой машине КТ-2. Эксперименты проводили в диапазоне температур 30–300°C. Коэффициент трения оценивался в течение 60 с через каждые 10 °С.

Из результатов испытаний, представленных в виде зависимостей коэффициентов трения от температуры (рис. 1), видно, что использование пакетов функциональных присадок способствует значительному снижению коэффициента трения и уменьшению износа образцов. Наиболее низкое трение характерно для иностранных композиций, однако российский пакет также обеспечивает низкий и стабильный коэффициент трения, позволяющий гарантировать повышение срока службы турбинного оборудования. Проведенное исследование показывает возможность импортозамещения зарубежных пакетов присадок к турбинным маслам отечественными композициями, а также подчеркивает их потенциал и необходимость дальнейшего изучения.

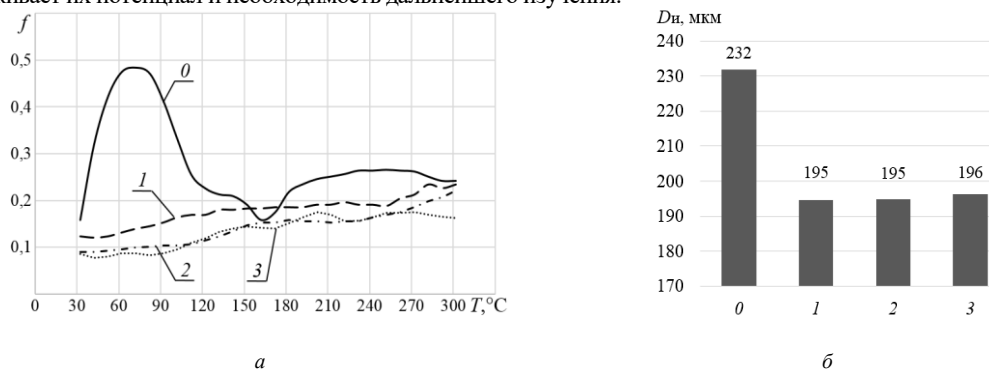


Рис. 1. Температурная стойкость (а) и диаметры пятен износа (б) при испытаниях турбинных масел:

- 0 – чистое базовое масло VHVI; 1 – VHVI+российский пакет присадок; 2 – VHVI+ Irgalube 2030A; 3 – VHVI+ Irgalube 2050
- [1]. Темердашев З.А., Иванова Ю.А., Колычев И.А. и др. Хроматографическое разделение и определение функциональных присадок в турбинном масле //Журнал аналитической химии. – 2019. – Т. 74. – №. 12. – С. 922-929.
- [2]. Резников В.Д., Шестаковская Т.В., Довгопол Е.Е., Чегурова М.Б. Зарубежные масла, смазки, присадки, технические жидкости. – М.: Техинформ, 2005. – 280 с.
- [3] Татур И. Р., Митин И. В., Спиркин В. Г., Макаров А. Д. Энергетические масла: учеб. пособие для студентов вузов: Часть I. Турбинные масла. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2019. – 228 с
- [4] Рюле Т. Турбинные масла – композиционные решения и тренды // BASF. We create. chemistry. Доклад, ноябрь 2016. – 35 с.
- [5] Патент № 2641005 Российская Федерация, МПК С10М 129/10 (2006.01), С10М 129/76 (2006.01), С10М 141/12 (2006.01) и др. Турбинное масло: N 2016138341: заявл. 27.09.2016: опубликовано 15.01.2018/ Татур И.Р., Спиркин В.Г., Шуварин Д.В., Мельников А.В., Курганов Д.В., Шарафутдинова Д.В., Шеронов Д.Н.; заявитель АО "Дальневосточная генерирующая компания". 6 с.

## Анализ свойств смазочных композиций на водной основе

Трофименко Б.П., Маркелов А.В.

ЯГТУ, институт «Инженеров строительства и транспорта» кафедры «Инфраструктура и транспорт»

e-mail: bog6741@yandex.ru

e-mail: aleksandr203.37@mail.ru

Износ является распространенной проблемой в технической эксплуатации автомобилей. Он может оказывать значительное влияние на работоспособность и безопасность транспортного средства. Одним из основных направлений влияния на процесс изнашивания является правильный выбор смазочных материалов. Кроме этого, смазки способствуют повышению эффективности и экономичности. Например, с использованием смазки с низким трением можно уменьшить энергозатраты на трение и улучшить показатели топливной экономичности.[1] В настоящее время осуществляется разработка альтернативных безнефтяных смазочных материалов на растительной и водной основе для применения в различных отраслях, включая транспорт, промышленность и пищевую индустрии. Смазочные материалы на водной основе являются новым направлением в разработке средств для транспорта. Это связано с тем, что они обладают рядом преимуществ перед традиционными масляными смазками, такими как экологическая безопасность и более низкий коэффициент трения.

В рамках работы проводится анализ технических характеристик смазочных композиций на водной основе в подшипниках. Приведено уравнение Рейнольдса (1), которое является основным, отражающим процессы, приводящие к развитию несущей способности слоя смазочного материала в условиях гидродинамики.[2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \times \left( \frac{h^3}{\eta} - \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \times \left( \frac{h^3}{\eta} - \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6v \times \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

Точность и надежность расчета несущей способности смазочного материала в условиях гидродинамики зависят от учета комплекса указанных выше факторов, находящихся в сложной взаимосвязи. Теория гидродинамической смазки позволяет найти параметры, характеризующие развитие в подшипнике рабочего процесса, учитывающие несколько влияющих факторов, что очень важно для анализа этой многофункциональной зависимости.

Аналитические и экспериментальные исследования показали возможность длительной работы подшипников при высоких удельных нагрузках при смазывании водой (пресной и морской) и минеральными маслами; обеспечения кратковременного температурного — барьера (~340°C), для длительной работы рекомендуется предельная температура 260°C; исключения схватывания пары трения со сталью даже при температуре около 400°C; получения коэффициента трения при трогании с места под высокой нагрузкой (начало движения) 0,05—0,06, что в 2,5 раза меньше, чем у баббита. [3]

Рекомендации, основанные на комплексе исследований, подтвержденных проверкой в натурных условиях, внедряются в промышленность в целях повышения качества работы, увеличения срока службы, экономии материалов и компактности изделий. Для кратковременной работы значения удельных нагрузок, могут быть увеличены в 2 раза. [2]

[1]. Кламани Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты.: Пер. с англ./Под ред. Ю. С. Заславского. – М.: Химия, 1988. – 488 с.

[2]. Мельникова В.А., Северцева Н.А. Т.4: Методы подбора в надежности. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

[3]. Горячева И. Г., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.

## Исследование фазовых превращений, происходящих в сплаве на основе Ti и Ni с проявлением эффектов памяти формы и сверхупругости

Хасьянова Д.У.

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

dinara.khasyanova@mail.ru

Среди всех известных в настоящее время материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) нитинол (сплав на основе TiNi) обладает самыми высокими механическими, технологическими и коррозионными свойствами, что определяет его широкие перспективы применения в машиностроении. [1] Интерметаллические соединения характеризуются не только высокой прочностью и пластичностью, но и обладают эффектом памяти формы (ЭПФ), сверхупругостью (СУ) или обоими этими свойствами сразу [2,3]. Обеспечение высоких и стабильных термомеханических свойств нитинола в диапазоне рабочих температур требует возможности изменять параметры ЭПФ и СУ в широком диапазоне. Научный метод решения этих задач заключается в выяснении природы и механизма действия ЭПФ, СУ на основе углубленных исследований свойств материалов. В зависимости от соотношения Ti, Ni и элементов сплава фазовый переход в сплаве может происходить при температуре от -200 до +100°C. Относительно нормальной температуры сплав может находиться в аустенитном (B2) или мартенситном (B19) состоянии (рис.1). Аустенитную фазу охлаждают до температуры ниже  $M_c$  (температура конца мартенситного перехода). [4] Формирующаяся фаза мартенсита (B19) деформируется при стационарной температуре, которая значительно ниже температуры перехода. В этом случае направление основной деформации обеспечивает простое линейное смещение плоскости, обычно сопровождающееся деформацией решетки. Максимальная деформация находится в пределах 7-8%. Последующий нагрев способствует обратному мартенситному превращению и восстановлению мартенситной неупругой остаточной деформации в соответствии со схемой B19→B2

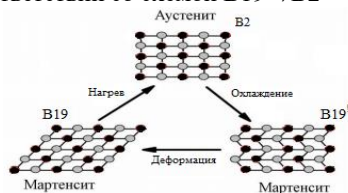


Рис. 1. Схема термоупругого мартенситного превращения

Если превращения при охлаждении материала проходят с образованием R фазы по схеме B2→R→B19 ( $T_R > M_n$ ),  $T_R$  — температура начала образования R-фазы,  $M_n$  — температура начала мартенситного превращения или B2→B19→R ( $M_n > T_R$ ) т.е. до, после или внутри мартенситного превращения (МП), накопление деформации мартенситной неупругости может осуществляться как при R превращении, так и МП. Величина деформации при R преобразовании может достигать 1,5%, что характеризуется узким температурным гистерезисом (3-5°C) и может быть суммировано с деформацией МП (если  $T_R$  не находится в МП). В случае двухэтапного характера структурной трансформации также наблюдался двухэтапный процесс накопления деформации и возвращения материалу формы. Для того, чтобы добиться накопления деформации во время R-преобразования, необходимо производить постепенное (для R и МП) охлаждение, поскольку потеря стабильности решетки происходит не сразу, а постепенно. Температурный интервал для преобразования B2→R и R→B19 может достигать 100°C. Для сплавов с фазовыми переходами, согласно схеме B2↔R↔B19, охлаждение при постоянной нагрузке способствует образованию мартенситных переходов. Переход B2→R обусловлен формированием ромбической фазы во время охлаждения под нагрузкой. При эквивалентности действующего напряжения степень восстанавливаемой деформации СУ значительно выше, чем у ЭПФ. Это связано с различными свойствами условий деформации материала при температурах выше и ниже  $M_n$ . Накопление деформации, начиная с состояния B2, начинается с фазы R, которая составляет 1-1,5%, а основное накопление осуществляется при превращении R в B19. При этом реализуются те варианты, которые наиболее благоприятны для образования напряжений сдвигового мартенсита и направление остаточной деформации которых превышает 8%. В результате накапливаемая деформация складывается из деформации B2→R + R→B19, составляющая до 10%. Нагрев до низкой температуры способствует фазовому переходу и приближает материал к стабильному состоянию.

Таким образом, высокие физико-механические свойства сплавов NiTi и TiNi обеспечиваются высоким уровнем предела текучести B2 фазы и низкой величиной напряжений пластичности превращения мартенситной (B19) фазы.

[1]. Хасьянова Д.У. Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов. Диссертация на соиск. Уч. Степ. Канд. Наук. МГУПИ, Москва, 2012г. 115с.

[2]. Курдюмов Г.В., Хандрос Л.Г. О термоупругом равновесии при мартенситных превращениях. т.66. Докл. АН СССР, 1949, №2, с. 211-214.

[3]. Лотков А.И., Гришков В.Н. Никелид титана. Кристаллическая структура и фазовые превращения. Изв.вузов. Физика, №5, 1985, с.68-87

[4]. Khasyanov, U., Romanov, A.N., Khasyanova, D.U., Khrushchov, M.M. Self-Oscillation Conditions in Alloys with the Shape Memory Effect (Journal of Machinery Manufacture and Reliability. Vol. 47 No. 3 (2018), 47, 3. DOI: 10.3103/S1052618818030081Степ. Канд. Наук. МГУПИ, Москва, 2012г. 115с.

# Изменение характеристик контакта при фрикционном разогреве углерод-углеродных композитов

Цуканов И.Ю., Любичева А.Н., Буковский П.О.  
Институт проблем механики РАН, Москва, Россия  
ivan.yu.tsukanov@gmail.com

## Цель

Теоретическое и экспериментальное исследование влияния температурных смещений поверхностей углерод-углеродных композитов (УУКМ) с волокнистой и тканевой структурой при фрикционном разогреве в паре с керамическим контртелом на изменение контактных характеристик сопряжения.

## Материалы и методы

Трибологические испытания проводились по схеме контакта «кольцо-диск» на лабораторном трибометре УМТ-2 (SETR, США) при следующих условиях: после установки заданного значения нагрузки фиксировалось и поддерживалось относительное смещение поверхностей  $\delta$  (с помощью каретки); начальная приложенная нагрузка составляла  $P_0 = 150 \pm 2$  Н; средняя скорость скольжения  $V = 1$  м/с.

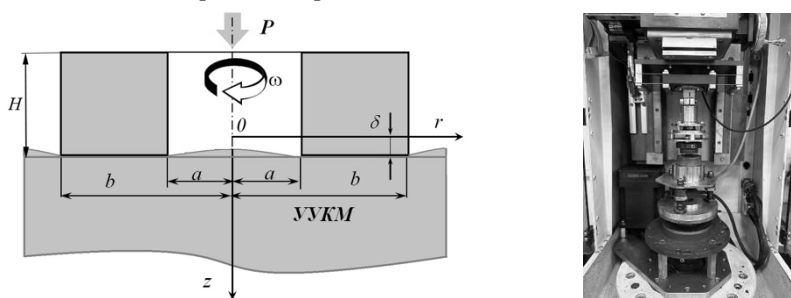


Рис. 1. Схема контакта при испытании УУКМ (слева) и трибометр УМТ-2 (справа).

Исследуемые образцы выполнены в форме дисков из УУКМ волокнистого (производства АК «Рубин», г. Балашиха) и тканевого (производства ООО «ГМК», г. Таганрог) типов. Для образца из волокнистого композита размеры составляли: диаметр  $D = 75$  мм, высота  $h = 13$  мм, а для тканевого –  $D = 40$  мм,  $h = 25$  мм. В качестве контртела использовалось кольцо из карбидкремниевой керамики: внутренний и внешний диаметры:  $2a = 20$  мм и  $2b = 28$  мм, соответственно; высота  $H = 12$  мм.

Для оценки влияния термического расширения на параметры испытаний проведены измерения смещений поверхности  $\Delta h$  образца после его нагрева в муфельной печи до заданной температуры с последующей выдержкой индикатором часового типа. Результаты измерений показали, что для волокнистого композита характерно температурное расширение в диапазоне температур  $23 \dots 250$  °С, а для тканевого – сужение. Такие отличия обусловлены особенностями структуры и свойств структурных элементов композитов, в том числе количеством и скоростью испарения влаги. По известной формуле и результатам измерений температурных смещений были построены графики зависимостей коэффициента линейного термического расширения (КТР)  $\alpha$  от температуры, из которых следует, что в диапазоне температур до  $120$  °С, которые наблюдались в ходе трибологических испытаний, эти зависимости могут быть аппроксимированы линейной функцией вида  $\alpha = kT$ , где  $k = 1 \cdot 10^{-10}$  (°С)<sup>-2</sup> (волокнистый композит) и  $k = -5 \cdot 10^{-11}$  (°С)<sup>-2</sup> (тканевый композит).

В качестве интегральной характеристики изменения условий контакта использовалось значение контактной жесткости, которое при постоянном смещении образцов характеризовалось отклонением нормальной силы  $P$  от начального значения  $P_0$  в зависимости от времени испытаний. Для теоретической оценки изменения нагрузки с ростом температуры при фиксированном смещении образца применялась математическая модель [1]. Используемые в расчетах модули Юнга и коэффициенты Пуассона: для волокнистого композита:  $E = 20$  ГПа,  $\nu = 0.3$ ; для тканевого композита (в поперечном слое ткани направлении):  $E = 18$  ГПа,  $\nu = 0.2$ .

## Результаты

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают хорошее совпадение расчетной кривой изменения нормальной силы от времени испытаний и экспериментальных данных. Для волокнистого композита вследствие его термического расширения жесткость пары возрастает; невысокие значения  $P/P_0$  связаны с исходными небольшими значениями нагрузки  $P_0 = 150$  Н и достигаемой температуры  $T < 100$  °С. Для тканевого композита наблюдается обратная ситуация: вследствие отрицательного КТР тканевого композита жесткость пары снижается. При этом на экспериментальной кривой наблюдаются скачки относительного значения нагрузки, которые могут возникать вследствие неравномерного изнашивания поверхности трения. Анализ изображений изношенных поверхностей показал, что для волокнистого композита характерен равномерный износ поверхности, а для тканевого композита – неравномерный со следами вырывания нижележащих слоев.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00548 П.

[1]. Цуканов И.Ю., Любичева А.Н. Влияние термического расширения поверхности углерод-углеродного композита на контактное взаимодействие с кольцевым образцом. Трение и износ 2023, 44, 4, 360–368.

## Модернизация машины шкода-савина для обеспечения постоянства эпюры давления

*Чхетиани П.Д., Щербakov Ю.И.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
pavelnew1@yandex.ru, shcherbakov1949@mail.ru

Одним из основных факторов, влияющих на корректность трибологических испытаний, является постоянство формы эпюры давления, как в течение опыта, так и от опыта к опыту.

В машине трения Шкода – Савина, предназначенной для сравнительных испытаний по схеме цилиндр-плоскость, испытуемый объект устанавливается с помощью тисков, поворачивающихся в различных направлениях и подсветки, фиксирующей зазор между образцом и роликом. Результат определяется по размерам вытертой лунки в исследуемом материале. К недостаткам данной схемы относится не только трудоёмкость установки, но и невозможность обеспечивать постоянство формы пятна износа и, следовательно, постоянство формы эпюры давления.

Очевидным конструктивным решением является схема с самоустановкой образца. Мы выравниваем пятно контакта по ширине контакта с помощью опор скольжения. Но, если ось вращения при самоустановке не на одной линии с линией контакта ролика и испытываемого образца, то при перестановке пары пятно контакта будет сдвигаться по длине контакта, в одну либо другую сторону, в зависимости от того где расположена ось вращения.



Рис. 1 Модернизированная машина трения Шкода-Савина

Эта схема эффективна лишь в начальный период работы установки, до разъединения пары трения. При износе (особенно значительном) после разъединения пары трения при возобновлении работы для установления первоначального положения необходимо подкладывать под образец пластину, с толщиной равной текущему износу.

В оригинальном варианте машины Шкода – Савина нагружающий ролик расположен консольно относительно оси приложения нагрузки. Как вариант, предлагается крепление ролика строго по центру приложения нагрузки. Этот вариант возможен из-за того, что смена твёрдого ролика (предполагается, что твёрдый ролик не изнашивается) происходит не часто и сборка-разборка узла нагружения не представляет собой большой сложности. Для снятия ролика предусмотрена гайка.

Измерение коэффициента трения на машине Шкода – Савина предложено в [1]. В схеме подвеска необходима лишь для тарировки момента трения. После тарировки подвеска снимается, и значение момента выводится на компьютер через тензодатчик. Для более точной фиксации момента трения после перестановки образца применяются пластины, как и в случае с установкой по длине контакта.

На фотографии (рис.1) показана комплексная модернизация, позволяющая в дальнейшем вывести данные, как по износу, так и по коэффициенту трения на компьютерную обработку.

[1]. Пружанский Л.Ю. Исследования методов испытаний на изнашивание. М: Наука 1978,112с.



# Новые консервационные и рабоче-консервационные смазочные материалы для вооружения и военной техники

Шолом В.Ю.

Хозрасчетный творческий центр уфимского авиационного института, Уфа, Россия  
rosoil@rosoil.ru

## Цель

Повышение временной противокоррозионной защиты вооружения и военной техники (ВВТ) при изготовлении, хранении, транспортировке и эксплуатации в различных климатических зонах в условиях повышенной влажности, морского климата, в широком температурном диапазоне за счёт разработки новых высокоэффективных консервационных и рабоче-консервационных смазочных материалов.

## Результаты и обсуждение

Для защиты от коррозии военной техники допущены к применению консервационное масло (КМ) «К-17» и КМ «НГ-203Р». Для противокоррозионной защиты, чистки и смазки стрелкового оружия допущены к применению ружейное масло (РМ) «КРМ» и РМ «РЖ». В настоящее время КМ «К-17», КМ «НГ-203Р» и РМ «КРМ» не производятся из-за отсутствия в Российской Федерации некоторых компонентов состава масел, а РМ «РЖ» имеет слабые защитные и чистящие свойства [1,2]. В связи с этим заявленная цель работы актуальна.

Результаты лабораторных испытаний трибологических характеристик, защитных и чистящих свойств новых отечественных универсальных смазочных материалов (УСМ) в сравнении с импортными аналогами представлены в табл.1.

Таблица 1. Результаты сравнительных испытаний универсальных смазочных материалов

№ п/п	Наименование УСМ	Нагрузка сваривания Р <sub>c</sub> , Н (ГОСТ 9490)	Диаметр пятна износа D <sub>n</sub> , при нагрузке 196 Н в течение 1 ч., мм (ГОСТ 9490)	Площадь коррозионного поражения пластин после 7 ч. испытаний, % (ISO 9227)	Количество удалённого порохового нагара, %
1	Росойл-РЖ	1960	0,45	0	53
2	Росойл-Вэдэшка	1568	0,50	1	42
3	WD-40	1470	0,75	14	37
4	Ballistol Universal	1382	0,55	83	40
5	Ballistol Gunex	1235	0,87	0	46

При проведении подконтрольной эксплуатации стрелкового оружия в Рязанском гвардейском высшем воздушно-десантном командном училище установлено, что по общим эксплуатационным свойствам РМ «Росойл-РЖ» существенно превосходит штатное РМ «РЖ» и рекомендовано для чистки, смазки и защиты от коррозии стрелкового и артиллерийского оружия [3].

В соответствии с современными техническими требованиями разработаны: универсальное консервационное масло «УКМ» и универсальное консервационное ружейное масло «УКРМ». Результаты испытаний защитной способности новых масел в сравнении с маслами «К-17» и «РЖ» по ГОСТ 9.054 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнительных испытаний защитной способности ружейных и консервационных масел

№ п/п	Метод испытания по ГОСТ 9.054	Ружейные масла		Консервационные масла	
		РЖ	УКРМ	К-17	УКМ
1	Метод 1, время до появления коррозии, циклы	3	Более 180	80	Более 164
2	Метод 2, время до появления коррозии, циклы	0,53	2	0,72	2
3	Метод 3, время до появления коррозии, циклы	0,52	12	3	12
4	Метод 4, время до появления коррозии, часы	20	Более 840	840	1656
5	Метод 5, площадь коррозионного поражения, %	70	0	75	0
6	Метод 6, время до появления коррозии, циклы	12	32	30	35

Результаты испытаний защитной способности масел «УКМ» и «УКРМ» показали, что они соответствуют современным техническим требованиям, предъявляемым к КМ и РМ, и многократно превосходят товарные масла «РЖ» и «К-17».

[1]. Иванов М. Г., Иванов Д. М. Об антикоррозионных свойствах ружейного масла РЖ. Проблема ингибитора коррозии АКOP-1. // Бултеровские сообщения. 2021. Т. 66. № 5. С. 51.

[2]. Спиркин В. Г. и др. Разработка нового консервационного масла типа К-17. // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2014. № 56. С. 267-272.

[3]. Шолом В.Ю. и др. Результаты испытаний универсального консервационного ружейного масла «Росойл-РЖ». // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "Новые материалы и энергетика в ВС РФ": сб. статей научно-технической конф. 20 апреля 2022 г. Анапа: ФГАУ "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2022. С. 164-172.

## Оценка смазочного действия технологических порошковых материалов при волочении прутковых заготовок

Шульга Г.И., Самойленко М.Н., Скринников Е.В., Колесниченко А.О. Черников Н.С.

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

Технологический процесс волочения широко применяется в производстве металлических прутков, проволоки, труб. Производится на волочильных станах, основными частями которых являются волокна и устройства для протяжки заготовки [1]. Для уменьшения напряжений в заготовке, осевых усилий волочения, улучшения качества поверхности деформированных заготовок, получения заготовок с заданной геометрией используют технологические смазочные материалы, покрытия, наносимые в контактную зону поверхность заготовки – волокна или поверхность заготовки. При холодном волочении заготовок по видам (состояниям) используют твердые, порошковые (сухие), полужидкие и жидкие смазочные материалы. Перспективными технологическими смазочными материалами для холодного волочения прутковых заготовок являются порошковые смазочные материалы. Разработан водорастворимый технологический экологически безопасный порошковый смазочный материал ПСМ-2 для волочения прутковых материалов и проволоки из углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов.

Цель работы разработка метода оценки смазочных свойств порошковых смазочных материалов при волочении прутковых материалов и проволоки. Разработана методика оценки смазочных свойств технологических порошковых материалов.

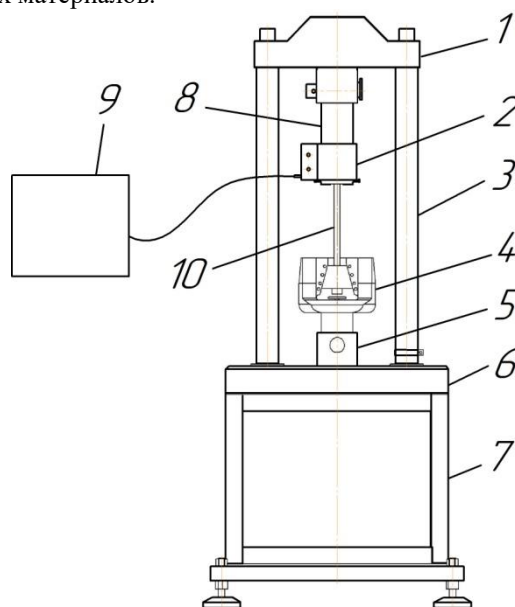


Рис. 1. Схема волочения прутковых заготовок на разрывной испытательной машине РМГ – 300МГ4: 1 – упорная траверса;

2 –нагревательный элемент; 3 – штанга; 4 – клиновый захват заготовки; 5 – стакан; 6 – опорная плита; 7 – основание; 8– приспособление для волочения прутковых материалов; 9 – терморегулятор, 10 -заготовка

Схема стенда для волочения прутковых заготовок, представленном на рис.1, включает: разрывную машину РМГ-300МГ4, состоящую из основания 7, опорной плиты 6, стакана 5, с закрепленным в нем клинового захвата 4, двух штанг 2, упорную траверсу 1. Приспособление для волочения 8 позволяет производить волочение прутковых материалов с волокнами из различных твердых сплавов. В стенде предусмотрен нагревательный элемент 2 с терморегулятором 9, предназначенных для проведения испытаний смазочных материалов при температурах 18-200<sup>0</sup> С.

Показателями относительной деформации металла при волочении со смазочными порошковыми материалами являются: интегральная деформация удлинения  $il$ ; относительное обжатие  $\delta$ ; относительное удлинение  $\lambda$ , скорость нагружения образца  $v$ . Методика также позволяет в лабораторных оценивать нагрузку текучести  $F_t$ , разрушающую нагрузку  $F_b$  образцов, рассчитывать коэффициент трения, оценивать эффективность порошковых смазочных материалов при волочении заготовок диаметром 8–12 мм из различных материалов .

Приводятся результаты исследований порошкового смазочного материала ПСМ-2 и других смазочных материалов по данной методике.

[1]. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Metallurgia,1971. 2-е изд. – 448 с.

## Оценка антифрикционного действия топокомполитов при вытяжке листовых сталей

Шульга Г.И., Черников Н.С., Скринников Е.В., Колесниченко А.О., Самойленко М.Н.

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

Вытяжные штампы при вытяжке листовых сталей выходят из строя вследствие адгезионного взаимодействия в трибосопряжениях штамповый инструмент – заготовка, в результате которого образуются налипания, задиры, царапины на штамповом инструменте и заготовке, а на радиусах матриц развиваются усталостные процессы, при которых происходит разрушение контактирующих с заготовкой поверхностных слоев штампов. Для устранения данных недостатков предложено использовать двухслойные водорастворимые покрытия – топокомполиты, которые наносят на обе стороны заготовки [1]. Верхний слой покрытия обеспечивает антифрикционное действие, а нижний слой – адгезионное действие к подложке и совместно с верхним слоем препятствует контактированию поверхности заготовки и штампа в процессе вытяжки изделия.

Цель работы разработать комплексный метод испытаний при вытяжке листовых сталей, легированных никелем, хромом и другими элементами с использованием топокомполита ТК-3 и разработать критерии оценки его антифрикционного действия. Испытания листового металла при нанесении топокомполита ТК-3 по разработанному методу проводили на модернизированном испытательном приборе МТЛ-10Г-1, схема которого приведена на рис. 1.

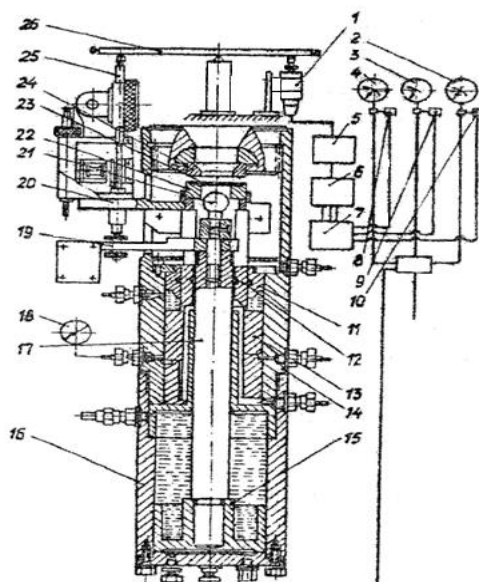


Рис.1 Схема модернизированного прибора МТЛ-10Г-1 для оценки эффективности топокомполитов при вытяжке листовых сталей: 1 – индуктивный датчик; 2, 3, 4 – силоизмерители; 5, 6, 7 – потенциометры; 8, 9, 10 – кабели подключения к силоизмерителям; 11, 12 – втулки; 13 – поршень прижима; 14 – штуцер; 15 – поршень вытяжки; 16 – цилиндр вытяжки; 17 – шток; 18 – манометр; 19 – кронштейн; 20 – кронштейн; 21 – пуансон сферический; 22 – кольцо прижимное; 23 – образец из листовой стали; 24 – матрица; 25 – шток индикатора; 26 – коромысло

При вытяжке образца 23 давление в гидравлической системе измеряют манометрами ЭКМ-16 2; и одновременно посредством датчиков давления 8,9,10, блока преобразователя 7 записывается электронным потенциометром модели Н338-1П.В прижимное кольцо 22, имеющее выточку, помещают испытуемый образец 23 из листовой стали диаметром 48 мм, толщиной 0,8-2,5 мм. При испытании ТК-3 использовали пуансоны сферический, цилиндрический диаметрами 20 мм, матрицу с радиусами 0,5-4,5 мм. Испытания топокомполита ТК-3 проводили при изменении нагрузки при вытяжке 0,3-10 тс; скорости перемещения пуансона 4,0-24,0 мм/мин; диапазон перемещения пуансона 20,0 мм; температура испытаний 18-24 из стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5582-75 толщиной 1 мм.

Критериями оценки антифрикционного действия топокомполитов при вытяжке листовых сталей на приборе МТЛ-10Г-1 являются: усилие текучести материала образца  $P_m$ ; максимальное усилие разрыва образца  $P_{Pmax}$ ; средний диаметр фланца после вытяжки  $D_{ф.ср}$ ; коэффициент предельной деформации  $K_{пд}$ ; коэффициент относительной предельной деформации  $K_{опд}$ ; относительная глубина вытяжки  $Nov$ .

Приводятся результаты исследований по данной методике топокомполита ТК-3 и других покрытий.

[1] Шульга Г.И. Функциональные водорастворимые технологические смазочные средства для обработки материалов: монография Ростов н/Д: Изв. вузов. Сев.-Кавк. Регион. 2004. – 212 с.

*Секция №5*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических направлений развития теоретической и прикладной акустики.**

**Председатель – Бобровницкий Ю.И., д.т.н.; Томилина Т.М., к.т.н.**

**Секретарь – Пономарёва С.Н, [ponomareva@imash.ac.ru](mailto:ponomareva@imash.ac.ru), [Svetlana-skv@mail.ru](mailto:Svetlana-skv@mail.ru)**

## Анализ вибрационной и ударной прочности научной аппаратуры космических аппаратов

*Асфандияров Ш.А., Пономарёва С.Н., Томилина Т.М.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
asfandiyarov@imash.ac.ru

Анализ вибрационной и ударной прочности является важным этапом разработки конструкций, подвергающихся высоким эксплуатационным механическим нагрузкам, например, космическим. Предварительный расчет прочности позволяет выявить возможные слабые места предложенной конструкции, обеспечивающей ее заданный функционал, которые могут возникнуть на стадии натурных испытаний на заданные нагрузки в составе космического аппарата. Расчет многоэлементной конструкции можно провести на основе упрощенной модели аналитически путем разбиения конструкции на отдельные элементы простейшей геометрии (стержни, балки, пластины и т.д.) и проведения независимых расчетов для каждого элемента. Однако такой подход не позволяет рассчитывать элементы, имеющие сложную форму, а также не учитывает взаимодействие элементов между собой. Численный Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет проводить расчет многоэлементной конструкции как единого целого, однако подробная МКЭ-модель со всеми конструктивными элементами (мелкие детали, болтовые и шарнирные соединения и т.д.) требует больших вычислительных мощностей и даже может приводить к некорректным результатам, поэтому требует особого внимания. В работе представлен анализ конструкций научной аппаратуры космических аппаратов (КА) на примере комплекса научной аппаратуры, прошедшей летную квалификацию на КА «Луна-25». Представлены предварительные результаты аналитических и численных расчетов по заданным механическим требованиям для перспективной миссии Луна Ресурс-1(ПА): продемонстрированы слабые места конструкций, определены низшие собственные частоты и поля напряжений в критически важных элементах.

Одной из наиболее сложных конструкций для анализа является конструкция Грунтозаборного устройства (ГЗУ), масса которой (около 20 кг) составляет значительную часть в общей массе полезной нагрузки. Основным элементом ГЗУ является буровая установка (БУ) с массой около 16 кг. На рис. 1а представлена конфигурация ГЗУ на КА с блоками электроники (БЭ) и кожухом. С механической точки зрения БУ представляет собой сложную составную конструкцию с большим количеством разных элементов со связями. При создании физико-механической модели конструкции БУ были выделены основные элементы конструкции, определяющие ее механические свойства и соответствующие связи, при этом производилась замена некоторых детализованных элементов на менее детализованные для оптимального анализа конструкции (рис. 1б). Все замены производились из механических соображений с учетом конструктивных особенностей, с сохранением величины массы и параметров жесткости конструкции. Расчеты собственных частот и прочности конструкции производились с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Расчетная МКЭ-модель и распределение напряжений в критичных узлах крепления показаны на рис. 2а,б.

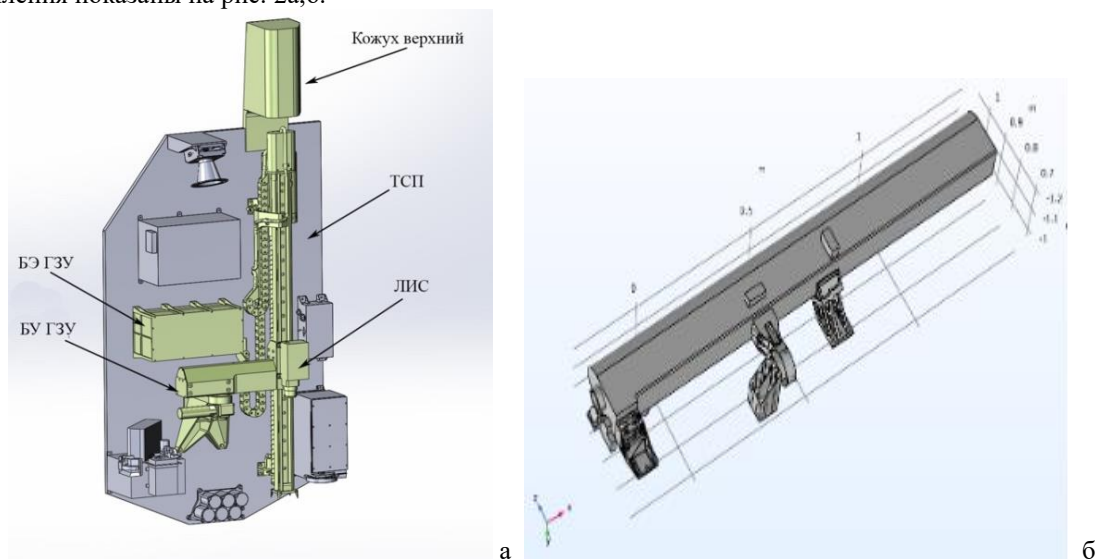


Рис. 1 Общий вид комплекса ГЗУ (а) и упрощенная физико-механическая модель (б)

Расчёты и анализ прочностных характеристик конструкции ГЗУ показали, что в части критерия жесткости она удовлетворяет заданным требованиям. Рассчитанная минимальная собственная частота буровой установки равна 66 Гц, что формально соответствует требованиям технического задания не иметь собственных частот ниже 40 Гц. Конструкции всех блоков ГЗУ удовлетворяют требованиям по прочности

при механических воздействиях. Коэффициенты запаса прочности по напряжениям для всех узлов ГЗУ превышают минимально допустимое значение 1.5, заданное в ТЗ. Наименьшее расчётное значение коэффициент запаса прочности  $KЗ=1,7$  наблюдается в верхнем узле зачековки буровой установки при ударной нагрузке (рис. 2б).

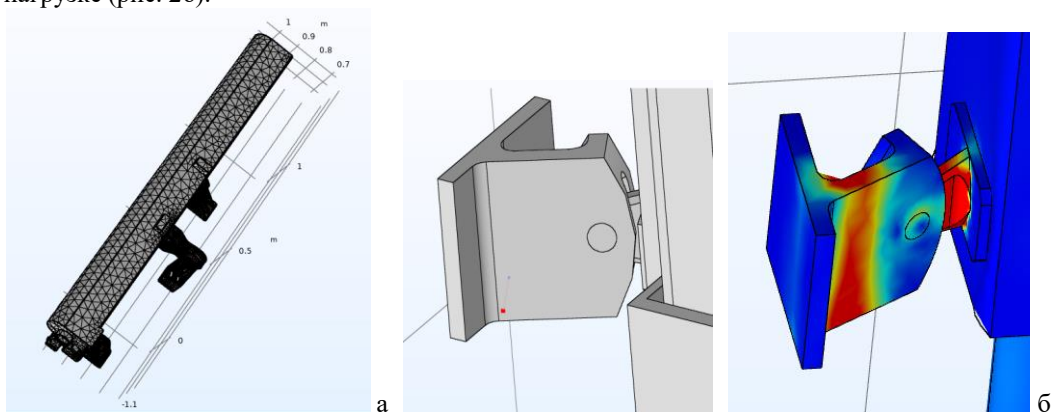


Рис. 2 Расчетная МКЭ модель (а) и критичные узлы крепления БУ к КА с распределением напряжений (б)

Ниже представлено описание и прочностные характеристики более простых конструкций приборов, входящих в комплекс научной аппаратуры (НА) КА. Прибор БУНИ-ЛР, установленный на основной научной палубе, для коммутации электропитания и информационного обмена всей НА со служебными системами КА. С механической точки зрения прибор представляет собой жесткую 3-х секционную коробчатую корпусную конструкцию, которая крепится к аппарату через нижнюю секцию в 6-ти посадочных местах, с электронными платами. Масса прибора (5,7 кг) распределена относительно равномерно. Материал корпуса - сплав АМг-6. Расчетное значение фундаментальной частоты прибора ( $>200$  Гц) существенно превышает минимально допустимое по требованиям (40Гц). Коэффициент запаса прочности  $> 5$ .

Прибор СТС-Л – многоблочный прибор, состоящий из блока сбора и обработки данных (БСД), четырёх широкоугольных оптических камер КАМ-О и четырёх узкоугольных камер КАМ-С, установленных в разных местах КА. Собственные частоты всех блоков СТС-Л превышают 200 Гц. Минимальный коэффициент запаса прочности 4.2.

Прибор Радиомаяк является источником высокостабильного радиосигнала. Собственные частоты устройства превышают 950 Гц, минимальный коэффициент запаса равен 5.5.

По результатам предварительного анализа конструкций приборов был сделан вывод об удовлетворении всеми приборами требований по прочности, что в последующем было подтверждено экспериментальными испытаниями. В результате анализа механических свойств конструкций приборов, входящих в состав КА, установлено, что значения фундаментальных частот для всех конструкций выше 40 Гц – минимально допустимой частоты по требованиям.

## Разработка и исследование ультразвуковой воздушной 128-элементной фокусирующей решётки

<sup>1,2</sup>Асфандияров Ш.А., <sup>1</sup>Цысарь С.А., <sup>1</sup>Сапожников О.А

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
asfandiyarov@imash.ac.ru

Акустические волны ближнего ультразвукового (УЗ) диапазона (частоты от 20 до 100 кГц) способны распространяться в воздухе на расстояние в несколько метров и поэтому находят многочисленные практические применения, например, в охранных системах безопасности, отпугивателях животных, приборах измерения уровня жидкости, устройствах для бесконтактного измерения расстояний (в частности, в устройствах парковки автомобилей), пеногасителях и т.п. [1]. В последние годы активно исследуются многоэлементные воздушные УЗ решетки, которые позволяют иметь больше контроля над создаваемым акустическим полем [2, 3]. Однако существующие прототипы решеток являются маломощными, поэтому возможности их применения в промышленности ограничены. В Лаборатории медицинского и промышленного ультразвука МГУ разработана многоэлементная спиральная фокусирующая решетка для создания высокоинтенсивных УЗ пучков в воздухе (рис. 1).

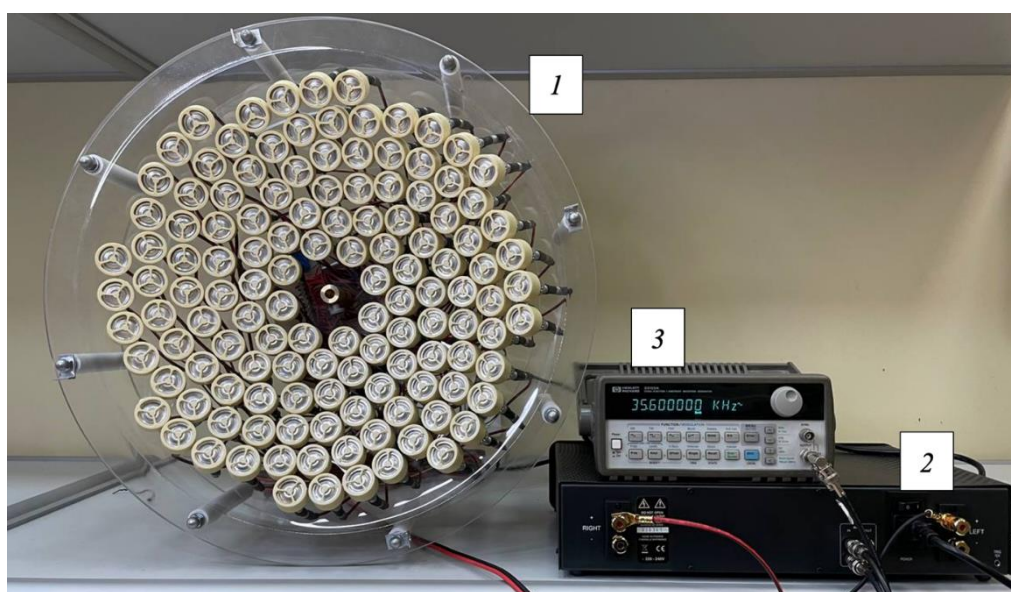


Рис. 1. Фотография изготовленной 128-элементной фокусирующей решетки и сопутствующего оборудования. 1 – решетка, 2 – бытовой усилитель мощности Atoll AM 200, 3 – генератор сигналов Agilent 33250A.

Решетка имеет форму сегмента сферы с радиусом кривизны 0.5 м и состоит из 128 пьезокерамических преобразователей с центральной частотой излучения 35.5 кГц. Конструкция решетки позволяет регулировать положение каждого излучающего элемента и тем самым проводить фазировку решетки. В работе представлены результаты экспериментального исследования разработанной решетки методом акустической голографии. Метод позволил выявить плохо излучающие элементы, а также подтвердить восстановление их работоспособности после подстройки их резонансных частот.

[1] Gallego-Juárez J.A. *et al.* // Ultrasonics. 2000. No 38(1-8). P. 331.

[2] Liebler M. *et al.* // J. Acoust. Soc. Am. 2020. No 148. P. 1713.

[3] Marzo A., Barnes A., Drinkwater B.W. // Rev. of Scient. Instr. 2017. No. 88. P. 085105

## **Черное тело и наилучший поглотитель колебаний: моделирование, реализация, применение**

***Бобровицкий Ю.И.***

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

yuri@imash.ac.ru

Поглощение колебаний – важнейшее физическое свойство всех материальных сред и структур, заключающееся в превращении колебательной энергии в тепло. На нем основан, в частности, один из основных методов решения проблемы снижения уровней шума и вибраций в машиностроении, на транспорте, в строительстве и других областях. В начале доклада представлен краткий аналитический обзор имеющихся в настоящее время результатов научных и прикладных исследований в этой области. Особое внимание уделено двум теоретическим результатам, играющим ключевую роль в проектировании и создании эффективных поглотителей колебаний, в том числе и с использованием современных виброакустических метаматериалов. Это прежде всего введенное в середине 19-го века Г. Кирхгофом понятие о черном теле, которое полностью поглощает всю падающую на него колебательную энергию. Второй результат – это понятие о наилучшем поглотителе [1], который среди всех возможных линейных вязко-упругих тел такой же геометрии поглощает наибольшее количество колебательной энергии. Черное тело и наилучший поглотитель обладают различными свойствами и имеют разные области практических приложений. Эти два идеальных тела могут быть реализованы только приближенно, так что практически все известные сегодня конкретные поглотители можно разделить на две большие группы по степени близости к одному из них. Далее в докладе описана схема нового поглотителя вибраций, основанного на приближении к наилучшему поглотителю и являющегося развитием работы [2]. Существенное увеличение эффективности поглощения достигается в нем благодаря протяженности его реакции на внешнее воздействие.

[1] Бобровицкий Ю.И. Импедансная теория поглощения звука: наилучший поглотитель и черное тело. *Акустический журнал*, 2006. Том 52, №6, с. 742 – 752.

[2] Бобровицкий Ю.И., Морозов К.Д., Томилина Т.М. Оптимальный поглотитель колебательной энергии (Представлено академиком РАН Р.Ф. Ганиевым 10.08.2016). *Доклады Академии наук*, 2018. Том 479, №5, с. 509 – 513.



## Дискретно-временное моделирование колебаний упругих тел в проблеме экспериментальной идентификации демпфирования

*Карпов И.А.*

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

karпов@imash.ac.ru

Разработка адекватных математических моделей и экспериментальная идентификация их параметров представляют собой критически важные этапы при проектировании и создании машин и конструкций с низким уровнем шума и вибраций. В данной сфере исследований активно работают специалисты из области идентификации систем [1], модального анализа [2] и других научных дисциплин. Несмотря на множество уже полученных полезных результатов, остаются не до конца решенные задачи. Одной из таких задач является точное определение уровня демпфирования (потерь) в колебательных системах [3]. Теоретические методы не могут обеспечить необходимую точность в расчетах данного параметра, а возможности экспериментальных измерений ограничены. Так, например, при использовании известного метода конечных элементов наибольшие проблемы возникают именно при точном определении демпфирования в моделях.

Настоящий доклад посвящен развитию перспективного метода экспериментального определения потерь, основанного на использовании дискретно-временных моделей колебательных процессов. В ранее опубликованных работах автора [4–6] на примерах была продемонстрирована работоспособность этого метода, а также высокая точность. В данном докладе представлены результаты развития этого метода, включая формулировку общего подхода к построению дискретно-временных ARX-моделей, рассмотрение области его применимости и анализ примеров его использования на реальных экспериментальных установках.

[1] Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 432 с.

[2] Ewins D.J. Modal Testing. Theory, Practice and Application. Baldock, UK: Research Studies Press, 2000. 574 p.

[3] Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М., Поглощение звука и метаматериалы (обзор); Акустический Журнал. 2018. Т. 64. № 5, с. 517-525.

[4] Карпов И.А. Параметрическое моделирование виброакустических дискретно-временных случайных процессов и применение для идентификации колебательных систем; Ученые записки физического факультета Московского университета. 2020. № 1. 2011701.

[5] Карпов И.А., Гребенников А.С., Ким. А.А. Применение параметрического моделирования случайных процессов для определения потерь в линейных колебательных системах; Известия РАН. Серия физическая. – 2021. Т. 85. № 6, с. 889-894.

[6] Карпов И.А., Гребенников А.С. Параметрический метод измерения потерь в колебательных системах; Сборник тезисов Всероссийского Аэроакустического форума. М.: ЦАГИ им. пр. Н.Е. Жуковского. 2021. с. 134.

## Особенности механических воздействий на конструкции научных космических приборов и их практическая реализация

Пономарёва С.Н., Гребенников А.С.

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

ponomareva@imash.ac.ru

Космические научные приборы подвергаются высоким механическим нагрузкам на этапе выведения космического аппарата (КА) на траекторию полета, поэтому важным этапом разработки оптимальной конструкции космической научной аппаратуры (КНА) являются отработочные вибрационные и ударные испытания. Космические приборы не являются серийными изделиями и разрабатываются под конкретную научную задачу. Каждая индивидуальная конструкция должна обеспечивать физический функционал и выдерживать заданные нагрузки. При этом важно как можно точнее смоделировать условия проведения наземных испытаний.

В последнее время актуальной задачей также становится проведение наземной отработки конструкций научных приборов на ударные нагрузки, возникающие при работе двигателей мягкой посадки и при приземлении. Данные нагрузки характеризуются импульсом 40-90 g большой длительности (до 40 мс) и, по сути, представляют собой «тупой» удар. В случае приборов малой массы (до 3 кг) проблем с воспроизведением заданных нагрузок обычно не возникает. Однако для научных приборов массой более 10 кг требуется предварительная настройка параметров стенда.

В работе представлен перечень образцов научных приборов, подлежащих наземной отработке, на примере КНА КА «Луна-25» (пример широкого спектра типов конструкций КНА показан на рис. 1а), а также виды отработочных вибрационных и ударных испытаний по заданным требованиям, описаны методики, использованные при проведении испытаний образцов научных приборов КА «Луна-25», приведены результаты этих испытаний. В работе также описаны результаты исследования реализуемости ударных воздействий высокой амплитуды и большой длительности на стенде свободного падения ВСТС 450/1000.

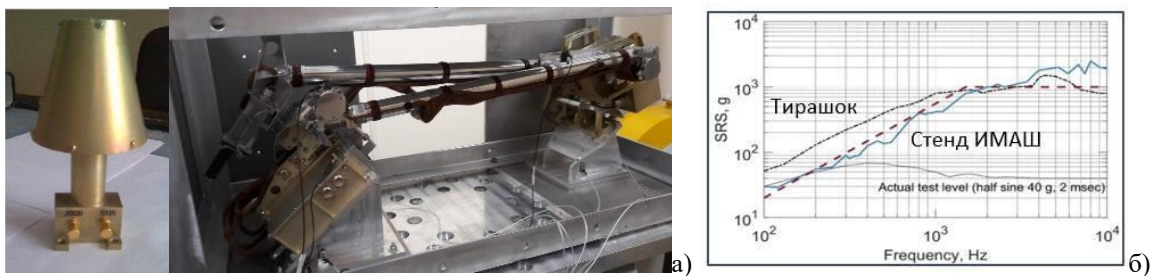


Рис.1 Научные космические приборы КА "Луна-25": а) - пьезоэлектрический датчик с размерами 60 × 125 мм (ПмЛ) и Лунный манипуляторный комплекс, ЛМК (длина в разложенном состоянии - ~ 1.6 м); б) – ударный спектр SRS заданный и полученный на стенде свободного падения и на стенде ИМАШ РАН.

Для испытаний на случайную вибрацию используются вибростенды с автоматической системой управления с обратной связью. Практика показала, что для высокоточных приборов подбор параметров стенда в реальном времени может приводить к перегрузке прибора, поэтому была разработана 2-х этапная методика испытаний, где на первом этапе измеряется АЧХ системы, подбирается цифровой фильтр и строится отфильтрованный сигнал возбуждения для получения заданного спектра воздействия (в терминах спектральной плотности мощности), а затем подается возбуждение отфильтрованным сигналом. В этом случае прибор испытывается максимально точно на заданный спектр. Данный алгоритм реализует разработанная сотрудниками ИМАШ РАН компьютерная программа с графическим интерфейсом.

В соответствии с современными требованиями к заданным характеристикам, которые необходимо получить при испытаниях на прочность при ударных воздействиях, требуемая характеристика - это спектральная зависимость от частоты ударного отклика, так называемая функция SRS. В этом случае при испытаниях по заданному спектру ударного отклика SRS не задается воздействие на прибор, а требуется подобрать такое воздействие, которое давало бы заданный спектр в местах крепления прибора к стенду. В этом случае задача не имеет однозначного решения. Подбор воздействия на прибор производится с использованием массового макета, и это длительная процедура. Для этих испытаний требуются специализированные стенды, реализующие эту процедуру. Как правило, это стенды на базе плиты на упругом основании (ringing table). На рис. 1б приведен пример ударных спектров, полученных на разных стендах, в сравнении с требуемым. Основное различие - на высоких частотах, а для стенда свободного падения – заметная перегрузка конструкции в области низких частот.

Для научных приборов, не имеющих в конструкции элементов, чувствительных к высоким частотам, испытания на ударные воздействия можно проводить по ударному импульсу на промышленном ударном стенде свободного падения. В этом случае требуется обеспечить определенное импульсное воздействие на объект, производя предварительную проверку настроек параметров стенда.

Для проверки реализуемости ударного воздействия на прибор по заданному импульсу с большой длительностью на стенде свободного падения ВСТС 450/1000 с техническими параметрами: пиковое ударное ускорение - 600g; длительность - от 0,3 до 30,0 мс были проведены тестовые испытания с габаритно-массовым макетом прибора с использованием оснастки для установки на плиту стенда. Общая масса изделия с плитой оснастки составляла 16 кг, для угловой оснастки масса составляла 24 кг. Результаты тестовых испытаний показали, что заданную длительность импульсного удара в диапазоне 20-40 мс стенд ВСТС 450\1000 обеспечить не может. При полной конфигурации стенда со штатным столом (масса 50 кг) и переходной плитой (масса 40 кг) для заданной амплитуды ударного ускорения в 40g длительность импульса составила не более 6,5 мс. В качестве примера на рис. 2а приведена запись одного из таких тестов при параметрах стенда: высота падения стола максимальная – 35 мм, натяжение рессоры 12 мм и набор подкладок: резина гофрированная 4 мм – 8 шт., резина 4 мм – 1 шт., фетр 12 мм – 1 шт.

В то же время теоретические расчеты по техническим параметрам стенда (см. рис. 2б - график зависимости силы удара  $F$  от длительности импульса  $\tau$ ) показывают, что в принципе такая возможность есть (см. пример расчета возможной длительности импульса ниже). Однако остается не ясным, как учитывается влияние демпфирования через прокладку на результат.

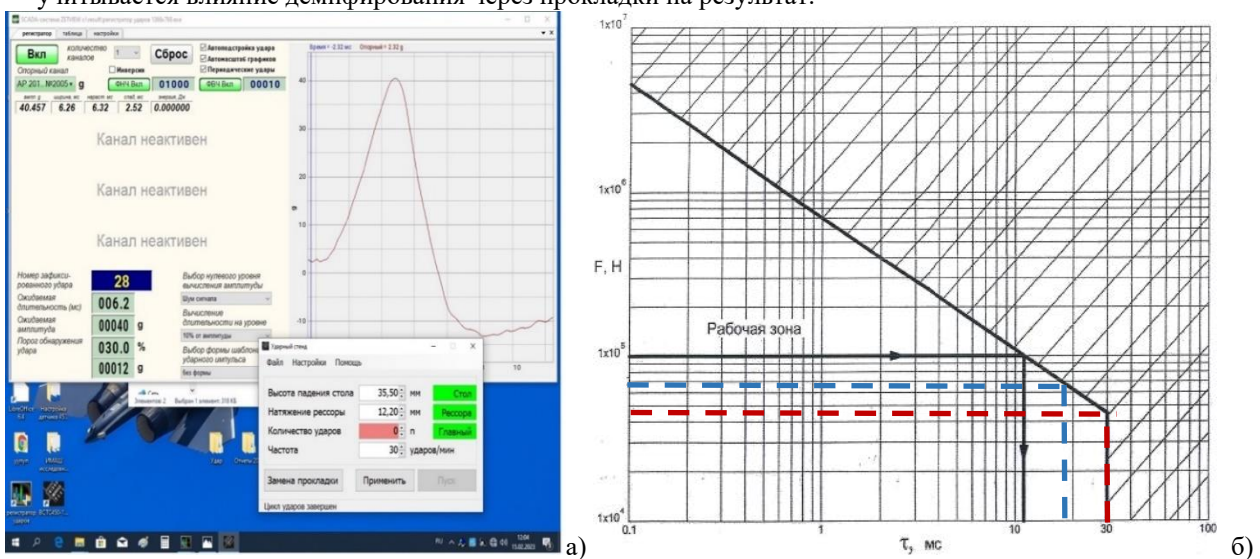


Рис.2 Подбор параметров стенда для заданного импульса: а) – экспериментальный график ударного импульса длительностью 6,3 мс и параметры стенда для заданной амплитуды ускорения 40 g; б) – предельные значения длительности импульса для заданных амплитуд ускорения 40 g и 90 g (черная линия со стрелками показывает область допустимых значений для силы удара в 105 Н)

Пример расчета возможной длительности импульса для требуемых ударных параметров. Для массы прибора с плитой оснастки  $m = 16$  кг при испытаниях с использованием основного штатного стола массой 50 кг и переходной плиты стенда массой 40 кг при заданной амплитуде ускорения  $a = 400$  м/с<sup>2</sup> (40g) сила ударного воздействия составляет  $F = M \cdot a = 106 \cdot 400 = 42400$  (Н),  $M=16+40+50$  (кг).

По графику для силы удара 42400 Н максимальная длительность импульса составит ~ 30мс (красный пунктир на рис.1б). Для испытаний прибора с угловой оснасткой ( $m=24$  кг), при таких же условиях, возможная длительность составит ~ 26 мс. При заданном ускорении  $a = 900$  м/с<sup>2</sup> (90g) и массе прибора с угловой оснасткой в 24 кг можно получить максимальное значение длительности импульсного воздействия ~ 18 мс при условии, что испытания проводятся на основном штатном столе массой 50 кг (синий пунктир на рис.1б). На практике это реализовать не удалось.

В заключение следует отметить, что при разработке конструкций научных приборов космического назначения и их наземной отработке для согласования противоречивых требований по обеспечению функционала, прочности и ограничениях по массе, для получения оптимальных решений необходимо научно-методическое сопровождение на всех этапах проектирования конструкции и ее механических испытаний.

*Секция №6*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических направлений развития механики машин и управления машинами.**

**Председатель – Глазунов В.А., д.т.н. профессор; Алешин А.К., д.т.н.,**

**Секретарь – Скворцов П.А., к.т.н., [skvortsovpa@yandex.ru](mailto:skvortsovpa@yandex.ru)**

## Методические основы исследования дефектных состояний и выявления диагностических признаков неисправностей узлов механизмов циклического действия

Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Статников И.Н., Фирсов Г.И.  
firsovgi@mail.ru

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

Требования регламентированных технических условий на механизм предписывают контролировать ряд его кинематических и силовых параметров. Для перенастраиваемого поворотного стола требования технических условий предписывают контролировать угловую скорость  $\omega(t)$  и ускорение  $\varepsilon(t)$  планшайбы, давления  $p_1$  и  $p_2$  в полостях гидромотора, координату  $\psi$  углового положения планшайбы. Это тот комплекс параметров, который позволяет оценить текущее техническое состояние механизма, и определить соответствие его функциональных характеристик требованиям технологического процесса, на выполнение которого настраивается механизм [1].

Но процесс диагностирования предполагает дополнительно к этому распознавать и упреждать на ранних стадиях процесс развития скрытых дефектов [2]. Как правило, комплекса параметров, указанного в технических требованиях, недостаточно для выявления скрытых дефектов. Требуется дополнительная информация. Её необходимо получить, измеряя дополнительно другие физические процессы, сопровождающие работу механизма. Поскольку измерение ряда параметров уже предписано требованиями технических условий, их целесообразно использовать также для решения задач диагностирования. Например, анализ дефектов поворотных столов [3] показал, что величины ускорений, скоростей, давлений в различных точках гидросистемы непосредственно связаны с дефектами отдельных механизмов и гидроаппаратов. Поэтому их целесообразно использовать в качестве диагностических параметров для локализации дефектов.

Основным требованием к диагностическому признаку является его высокая чувствительность к отклонениям от нормативной величины одного структурного параметра механизма и минимальная, к отклонениям остальных.

Выбор диагностических признаков основан на построении и анализе соответствующей процедуры выявления структурно-следственных связей элементов и деталей механизма и оценке чувствительности диагностических признаков к дефектам. Процедура строится как многоуровневая таблица. Элементы каждого уровня выполняют одну общую функцию.

Алгоритм построения процедуры состоит в следующем. Механизм разделяется на отдельные детали и их соединения в узлы. Из этого комплекса деталей выбираются такие, дефекты которых образуют дефекты всего механизма. Эта совокупность деталей образует первый уровень.

Второй уровень процедуры составляют совокупности конкретных геометрических размеров или физико-механических свойств деталей, отклонения которых от нормативных значений образуют дефект. Это структурные параметры механизма, подверженные деградации и подлежащие контролю. Отклонения других размеров детали, которые не влияют на образование дефекта, игнорируются.

Третий уровень — это количественное (численное) выражение отклонений указанных структурных параметров от своих нормативных значений.

Четвёртый уровень содержит информацию о том, как отклонения структурных параметров влияют на изменения экспериментально измеряемых кинематических и силовых параметров. Это комплекс диагностических признаков.

Пятый уровень составляют измеряемые физические процессы — диагностические сигналы, по которым определяются диагностические признаки и принимается решение о постановке диагноза.

Разработанная методика оценки диагностических признаков для узлов механизмов циклического действия позволяет:

- проводить контроль регламентированных ТУ параметров, совместно с дополнительными диагностическими параметрами позволяет на ранних стадиях локализовать развитие скрытых дефектов.

- обеспечить периодическое диагностирование на этапах переналадки и настройки механизма на очередной технологический процесс позволяет исключить значительные экономические затраты на ремонт аварийных состояний механизмов.

- выполнить детальный анализ экспериментально измеряемых диагностических сигналов, направленный на увеличение их информативности, который даст возможность сократить количество измеряемых диагностических параметров, оценить текущее техническое состояние по комплексу диагностических признаков, оперативно локализовать накопленные неисправности и определить комплекс влияющих на быстроходность устройств, воздействуя на которые можно регулировать быстроходность механизма.

- выявить структурно-следственные связи для установления соответствия между структурными параметрами и диагностическими признаками.

[1]. Aleshin A.K., Firsov G.I., Glazunov V.A., Kovaleva N.L. Analysis of Diagnostic Signs of Defective States of Mechatronic Mechanisms of Cyclic Action // Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics. Ed. by Zh. Hu, S. Petoukhov, M. He. — Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. — Pp. 218-227.

[2]. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Статников И.Н., Фирсов Г.И. Анализ и исследование дефектных состояний узлов механизмов циклического действия машин. Вестник научно-технического развития. № 168. 2023. С. 3-21.

[3]. Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Статников И.Н., Фирсов Г.И. Анализ и определение диагностических признаков дефектных состояний узлов механизмов циклического действия. Вестник научно-технического развития. № 170. 2023. С. 3-21.

## Разработка классификации и синтез ременных и тросовых приводов механизмов для пространственных движений

Борисов В.А., Ковалева Н.Л.

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

E-mail: v.a.borisov@yandex.ru

Целью работы является создание классификации ременных и тросовых приводов механизмов для пространственных движений, а также на основании выделенных классификационных признаков разработка методики синтеза таких приводов.

Для новых механизмов с ременными и тросовыми приводами, реализующих пространственные движения, могут быть синтезированы различные конструкции приводов в зависимости от назначения и количества степеней свободы. Новые механизмы с ременными и тросовыми приводами обладают рядом ключевых преимуществ: низкая металлоемкость и инерция конструкции, автономность и применимость в проектах безлюдных технологий, высокая адаптивность. Примеры такого типа механизмов показаны на рисунке 1 [1, 2]: а) с восемью тросовыми приводами; а) с шестью металлическими ремнями (лентами).

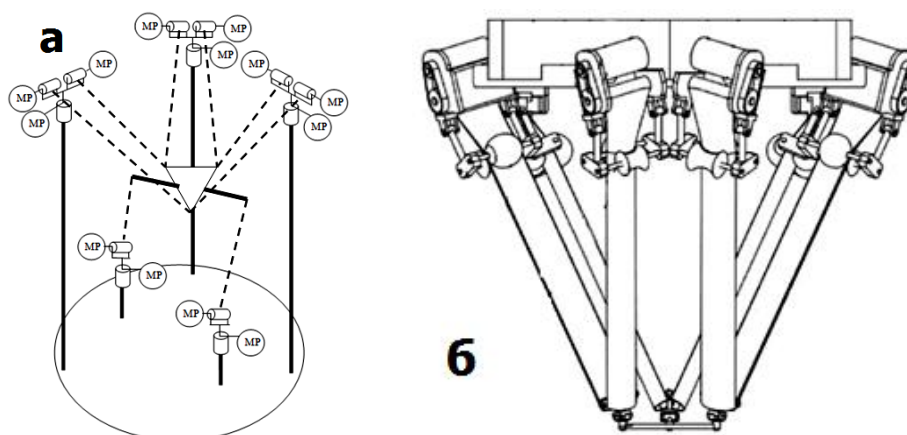


Рис. 1. Механизмы с ременными и тросовыми приводами [1, 2]: МР - мотор-редуктор.

Приводы рассматриваемой конструкции могут быть разделены на три основные группы: намотка осуществляется на барабан; намотка осуществляется на два барабана; без намотки на барабаны (шкивы). В редких случаях может осуществляться намотка на один барабан двух-трех тросов одновременно, приводы такого типа возможен, но будет применяться в исключенных случаях. Следующий классификационный признак может характеризовать применение сателитного звена, в качестве которого могут выступать: стержень, шарнирный параллелограмм, шкив и т.п. Такие звенья способствуют модификации конструкции механизма и позволяют улучшить его технические характеристики. Изменение расстояния между центральными осями привода может быть организовано за счет телескопического исполнения, значительного удаления от рабочего пространства и сложной пространственной траектории. Тросовый привод может растягиваться только за счет пружины и гравитационного воздействия и комбинировании приводов с манипулятором последовательной структуры. Для материалов привода могут применяться стальные канаты, текстильные канаты и ремни, резинотехнические ремни различного исполнения и жесткие звенья сателлиты сложной пространственной геометрий.

В общем виде получаем четыре-пять классификационных признака для ременных и тросовых приводов. При этом некоторые признаки могут иметь отдельные подклассы, как например дополнительные привод составного через шарнир выходного звена. Для достижения наибольшей общности в качестве классификационного признака предлагаем использовать отношение произведение массы выходного звена и ускорения свободного падения, отнесенное к сумме произведений модулей упругости звеньев приводов на сечение троса/ремня. Расчетные эксперименты, проведенные для двенадцати различных модификаций механизмов с ременными и тросовыми приводами, показали пригодность такой модели для решения классификационной задачи и применения этой модели в качестве базовой для синтеза новых приводов рассматриваемого типа.

[1]. Патент на полезную модель 210639 Российская Федерация, МПК F16H 19/06, B65H 59/38. Механизм с тросовыми приводами / Глазунов В.А., Борисов В.А.; Заявитель и патентообладатель ФГБУ науки ИМАШ имени А.А. Благонравова РАН. - № 2021139561; заявл. 29.12.21; опубл. 25.04.22, бюл. №12.

[2]. Патент Китай CN 102152301 A Six-freedom-degree parallel steel belt robot mechanism with roller device/B 25 J 9/08 от 17.08.2017.

## Механизмы с шестью степенями свободы с попарно параллельными осями приводов

<sup>1</sup>Гарин О.А., <sup>2</sup>Хейло С.В., <sup>3</sup>Рашиоян Г.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия.

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», Москва, Россия,  
sheilo@yandex.ru

<sup>3</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия, Москва, Россия

В работе рассмотрены синтез, исследование новых пространственных механизмов с шестью степенями свободы, с шестью кинематическими цепями и шестью приводами, расположенными на неподвижном основании. Рассмотренные механизмы обладают свойствами развязки, изоморфности и постоянства передаточного отношения при поступательных движениях. Такие механизмы с поступательными приводами могут быть представлены следующими структурными формулами 6-PRRS, 6-PRPS, 6-PRPaS. В работе исследован один из механизмов – механизм 6-PRRS. Он имеет неподвижное основание, выполненное в форме ребер куба и выходное звено в форме куба, содержит шесть кинематических цепей. Оси шести входных двухподвижных цилиндрических кинематических пар попарно параллельны друг другу и расположены на диагонально противоположных ребрах куба основания, а центры соответствующих конечных сферических кинематических пар расположены на параллельных диагонально противоположных ребрах куба выходного звена (рис.1).

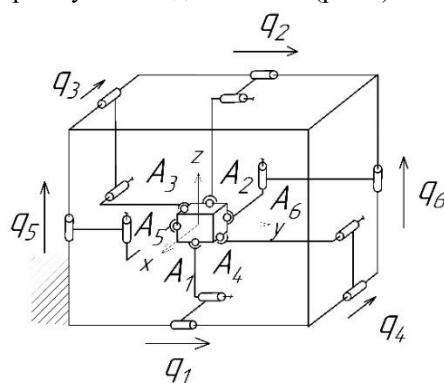


Рис 1. Механизм кинематической схемы 6-PRRS.

Решение задачи о положении подтверждает правильность выбранной кинематической схемы, возможность частичной развязки движений и свойство изоморфности механизма. Проведенный анализ особых положений с использованием сечений области сингулярности и методов компьютерного моделирования позволил определить пространство, в котором отсутствуют особые положения. Область особых положений находится за пределами конструктивных ограничений, что не влияет на работоспособность механизма. При исследовании особых положений установлено, что матрица **B** частных производных от уравнений связи по обобщенным координатам приводов не вырождается. Это указывает на отсутствие особых положений 1-го типа, связанных с потерей управляемости

Были составлены алгоритм и программа для определения размера и формы рабочей зоны. Установлены зависимости размеров рабочей зоны от длин звеньев кинематических цепей механизма. Это позволяет оптимально выбирать размеры промежуточных звеньев для получения необходимой рабочей зоны.

Важной задачей при проектировании машин и оборудования является расчетное обоснование точности. В работе была исследована зависимость точности позиционирования нового механизма от неточности изготовления его звеньев. Решение поставленной задачи выполнено на основе классического подхода к оценке точности.

При проектировании механизмов необходимо решать задачи обеспечения прочности, жесткости и долговечности. Для этого необходимо знать силовую нагрузку, действующую на звенья и кинематические пары. Силовой анализ механизма был проведен с использованием аппарата винтового исчисления. Были определены силовые винты, действующие на выходное звено со стороны кинематических цепей, и моменты силовых винтов относительно главных центральных осей инерции выходного звена.

Экспериментальное исследование физической модели подтвердило работоспособность нового механизма. Подтверждена форма и размеры рабочей зоны, определены максимальные углы поворота выходного звена. Показана возможность кинематической развязки поступательных и вращательных движений.

[1]. Патент РФ №182355. Пространственный механизма с шестью степенями свободы. Хейло С.В., Глазунов В.А., Гарин О.А., Царьков А.В., Разумеев К.Э.

[2]. Патент РФ №176040. Пространственный механизма с шестью степенями свободы. Хейло С.В., Глазунов В.А., Гарин О.А.

## Адаптивные методы управления локомоцией антропоморфных и зооморфных роботов

<sup>1,2</sup>Горобцов А.С., <sup>1</sup>Скворцов С.А.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
skvorcov@mail.ru

<sup>2</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия  
vm@vstu.ru

### Цель

Разработка и анализ адаптивных методов управления локомоцией шагающих роботов, работающих в реальном времени на основе обобщенной задачи динамического уравнивания.

### Основные результаты

Существующие методы управления антропоморфными и зооморфными роботами, в том числе с применением нейросетевых методов, требуют значительных вычислительных затрат и не обеспечивают синтез устойчивого управления в различных режимах движения. Рассматривается синтез управления движением таких роботов на основе обобщенной задачи динамического уравнивания [1,2]. Суть метода сводится к обеспечению заданных законов изменения реакций в некотором подмножестве связей за счет изменения реакций в другом подмножестве связей, которые интерпретируются как управляющие воздействия в приводах звеньев робота.

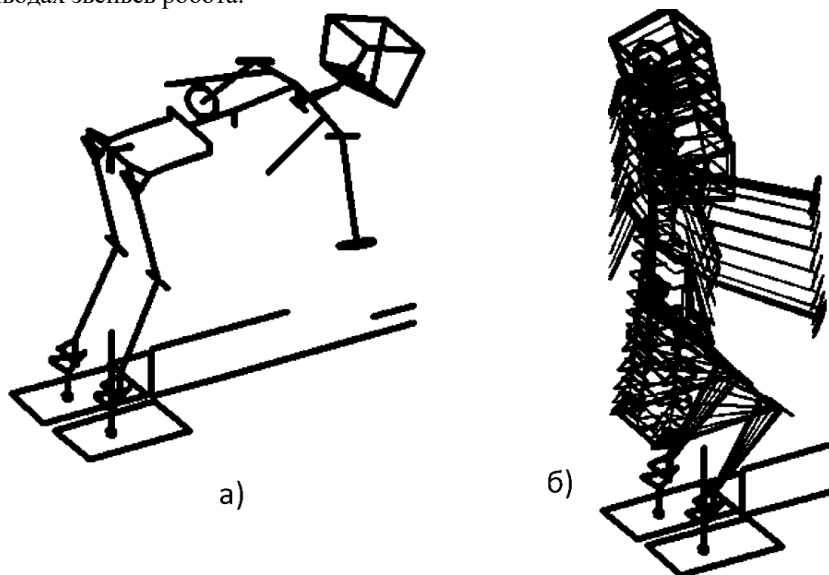


Рис. 1. Результаты моделирования управляемого движения робота при выполнении приседаний, а – без стабилизации – движение неустойчиво, б – со стабилизацией – движение устойчиво.

В качестве примера, рассмотрена задача управления движением антропоморфного робота при выполнении приседаний. Найдены законы изменения моментами шести приводов в ногах робота, заданных периодической функцией изменения вертикальных реакций в стопах. Управление моментами является неустойчивым, поэтому предложен метод стабилизации на основе коррекции управляющих моментов по отклонению характеристик движения робота от программного движения. В качестве таких характеристик используются координаты ц.м. системы и ее кинетический момент. На рисунке 1 показаны примеры управляемого движения робота при выполнении приседания без и со стабилизацией. Предлагаемый метод, на базе обобщенной задачи динамического уравнивания теоретически позволяет получить управление для произвольного движения роботов со сложной локомоцией в режиме реального времени на существующей и перспективной (нейроморфной) микропроцессорной базе.

[1]. А.С. Горобцов и др. // Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning, Sensors, 2022, Vol. 22, issue 22 (November-2). - Article 8920. - 14 p. - DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228920>

[2]. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения / А.С. Горобцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 3 (756). – С. 14-24. – DOI: 10.18698/0536-1044-2023-3-14-24.



# Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН

*Николаев А.В.*

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

**Машиноведения институт** имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ), научная организация, ведущая исследования в различных областях технической механики. ИМАШ является правопреемником Института машиноведения Академии наук СССР (АН СССР), образованного 13 ноября 1938 г. в г. Москве на базе Комиссии машиноведения при Группе технической механики отделения технических наук АН СССР (Комиссия образована в начале 1936 г. и упразднена в связи образованием ИМАШ АН СССР). Кроме того, предшественниками института являлись: Комиссия по изучению долговечности машин при АН СССР, Машиностроительная секция Технического совета (ТЕСО) АН СССР, организованная Е.А. Чудаковым в начале 1936 г. (ТЕСО создан в 1934 г.; председатель – академик Г.М. Кржижановский).

В ИМАШ при его организации было всего 24 человека [1]. Организатор и первый директор ИМАШ – Е.А. Чудаков, руководивший институтом до последнего дня своей жизни. С февраля 1954 г. директор института – А.А. Благонравов, имя которого присвоено институту в 1976 г. В дальнейшем институтом руководили К. В. Фролов (1975–2007), Р.Ф. Ганиев (2009–2015), В.А. Глазунов (с 2015 г. по н. в.).

С 1939 по 1961 г. ИМАШ находился в составе Отделения технических наук АН СССР, которое возложило на институт создание научных основ конструирования и расчета машин, их производства и эксплуатации. В 1941 г. институт был эвакуирован из Москвы в г. Казань, где основной задачей стало решение проблем авиастроения. В 1943 г. институт был реэвакуирован. В этот период в институт входили пять отделов (теории машин и механизмов; точной механики; конструирования и деталей машин; трения и износа в машинах; резания) и две секции (технологии машиностроения; электросварки) [2].

В 1950–1960 гг. структура и состав института неоднократно менялись. 20 октября 1950 г. в ИМАШ из Института точной механики и вычислительной техники был переведен Отдел академика Н.Г. Бруевича для исследования проблем кинематики и кинестатики пространственных механизмов [2]. В январе 1959 г. на базе института создана Лаборатория прочности деталей при повышенных температурах, а на базе 1-го Государственного подшипникового завода – Комплексная лаборатория института.

ИМАШ в 1961 г. был передан в ведение Государственного комитета Совета Министров СССР, позднее – Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности СССР.

В 1969 г. ИМАШ выступил инициатором создания Международной федерации по теории машин и механизмов (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science, IFToMM) [3].

В 1979 г. институт передан из состава Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности СССР в ведение АН СССР. 1 апреля 1980 г. ИМАШ включили в состав Отделения механики и процессов управления АН СССР, тогда же утвердили основные направления научных исследований института: механика машин и управление машинами; виброакустика машин, вибрационные процессы; биомеханика систем «человек-машина-среда»; прочность, надежность и долговечность машин и конструкций; трение и смазка в машинах. В этом же году на институт было возложено руководство Научным советом АН СССР по проблеме «Роботы и робототехнические системы» [2].

ИМАШ в 1980–1990 гг. годы расширяет круг изучаемых проблем в области технической механики и создает новые обособленные научные подразделения (филиалы) в городах Свердловск (ныне – г. Екатеринбург), Ленинград (ныне – г. Санкт-Петербург), Горький (ныне – г. Нижний Новгород), Саратов и Куйбышев (ныне – г. Самара). В 1982 г. ИМАШ и Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения Министерства тяжелого машиностроения СССР были утверждены головными организациями Проблемной комиссии «Машиностроительный комплекс СССР». С 1986 г. институт включен в состав Отделения проблем машиностроения, механики и процессов управления. 30 января 1986 г. в составе ИМАШ окончательно сформирован филиал института в г. Свердловске на базе Отдела комплексных проблем машиностроения Института металлургии Уральского научного центра АН СССР. Тогда же созданы Ленинградский и Горьковский филиалы ИМАШ, которые в последствии были преобразованы в самостоятельные институты РАН. В 1987 г. были организованы филиалы ИМАШ в г. Саратове и в г. Куйбышеве с конструкторским бюро и опытным производством [2].

В 1994–2013 гг. ИМАШ становится головной организацией Межотраслевого научно-технического комплекса «Надежность машин» и координирует работу более 50 организаций из различных министерств и ведомств.

С 2002 г. по н. в. ИМАШ входит в Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН и состоит из научных отделов «Механика машин и управление машинами», «Прочность живучесть и безопасность машин», «Конструкционное материаловедение», «Трение, износ, смазка. Трибология», «Вибрационная биомеханика», «Теоретическая и прикладная акустика» «Виброакустика машин», а также Научного центра нелинейной волновой механики и технологии РАН, организованного академиком Р.Ф. Ганиевым в 1995 г.

В ИМАШ работали и работают выдающиеся ученые: академики Акулов Н.С., Артоболевский И.И., Благонравов А.А., Бочвар А.А., Бруевич Н.Г., Ганиев Р.Ф., Дикущин В.И., Кононенко В.О., Линник В.П., Микулин А.А., Работнов Ю.Н., Рыкалин Н.Н., Серенсен С.В., Чудаков Е.А., Фролов К.В., Хренов К.К., Целиков А.И. и др.; члены-корреспонденты Акимов Г.В., Аркадьев В.К., Беляев Н.М., Ганиев О.Р., Добровольский В.В., Махутов Н.А. и др.

При ИМАШ издаются журналы: «Проблемы машиностроения и надёжности машин» (с 1965), «Проблемы машиностроения и автоматизации» (с 1982) и «Машиностроение и инженерное образование» (с 2004).

[1]. Вестник РАН, 2000, том 70, № 12, с. 1059–1068.

[2]. Профиль, структура и работа Института машиноведения АН СССР. 1943 г. АРАН. Ф.2. Оп.1–1943. № 43.

[3]. АРАН.Ф.2. Оп. ба. Д. 79. Л. 64; Д. 157. Л. 46, Л.126; Д. 551. Л. 180; Д. 791. Л. 17; Д. 1079. Л. 10; Д. 1119. Л. 12; Д. 1317. Л. 33; Д. 1331. Л. 40.

[4]. Вестник АН СССР. 1989. №8. С. 142.

## Методология риск-ориентированного проектирования машин

<sup>1</sup>Панов А.Н., <sup>2</sup>Махутов Н.А.

<sup>1</sup>ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия

a.panov@tut.by

Существующая парадигма детерминированного, статистического, вероятностного подхода и допускового мышления в машиностроении, машиноведении становится все более несоответствующей как планетарному развитию, так и для реализации провозглашенных в РФ (Федеральные законы и т.д.) стратегий развития и использованию риск-ориентированного подхода, а также мышлению на основе рисков, применяемых в международных методологических стандартах (ISO 31000, ISO 9001, МЭК 60300 и др.), для создания техники.

В развитии прочностного (Серенсен С.В. и др.) и ресурсного (Кузнецов Н.Д. и др.) проектирования в машиностроении потребовалось создание новой методологии машиноведения, основанной на парадигме риск-ориентированного мышления [1-6]. Предложено: использовать термин – «риск-ориентированный жизненный цикл машины»; применять парадигму риск-ориентированного проектирования продукции, процессов изготовления и т.д. По результатам проведенных исследований и апробации на практике разработаны основы научно-методического обоснования прочности и ресурса объектов машиностроения, с учетом конструкторско-технологических рисков.

Функционирование сложной социотехнической системы с существенно нелинейными характеристиками, подверженной рискам событий, вариаций, бифуркациям предложено рассматривать в виде требуемого для заинтересованных сторон аттрактора состояний, а методической базой управления состояниями - фрактальный подход.

Разработаны и предложены для использования новые определения терминов «качество», «надежность», «стандарт» и т.д. – основы методологии риск-ориентированного представления жизненного цикла социотехнических систем. Создана соответствующая система моделей: «вероятность - ущерб», «качество - цена», «вариация - ущерб»; шкала «значимость ущерба - вероятность»; «оптимизация затрат на управление рисками»; «измерительная система при риск-ориентированном подходе»; «интенсивность мгновенных отказов с учетом значимости приоритета»; «обеспечение надежности для невозстанавливаемой / восстанавливаемой продукции – нагруженность / деградация - время» и др. Указанное включает разработку новых: видов конструкторско-технологических и т.п. документов («план управления рисками», «анализ рисков» и др.); технических характеристик в дополнении к номинальному значению и полю допуска, третью – идентификатора значимости приоритета – величина интегрального ущерба последствий в случае отказа технической системы.

Созданная методология обоснования соответствия объектов машиностроения положена в основу разработки серии государственных, межгосударственных стандартов для риск-ориентированного проектирования и изготовления для автотракторного, сельскохозяйственного, подъемно-транспортного, карьерного и специального машиностроения. Стандарты используются в Белоруссии (БелАЗ, МАЗ, Минский тракторный завод, Гомсельмаш, Амкдор и др.) с 2018 г. и разрабатываются [7] для применения в рамках ЕАЭС, СНГ и дружественных стран-партнеров (Китай и т.п.) в цепи поставок машиностроения. Применение стандартов, основанных на риск-ориентированном проектировании и изготовлении позволяет на порядки снизить вероятность несоответствия и существенно - себестоимость техники. Использование методологии риск-ориентированного подхода является научной основой машиноведения для обеспечения планетарной конкурентоспособности производителя, получения интегральной прибыли, как за счет снижения затрат на создание продукции на основе приоритизации требований и управления вероятностью отказов, так и за счет уменьшения «стоимости владения» для потребителей. Технические решения проиллюстрированы на примере обоснования прочности и ресурса с учетом конструкторско-технологических рисков несущих конструкций, определяющих предельное состояние мобильных машин.

[1]. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник – М.: Машиностроение, 1985. - 224 с., ил.

[2]. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов/ Н.А. Махутов, К.В. Фролов, Ю.Г. Драгунов и др.; под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина: Ин-т машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН- М.: Наука, 2000. - 499 с.

[3]. Махутов, Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность/под общ.ред. Н.А. Махутова – М.: МГОФ «Знание», 2018,–1016 с.: ил.

[4]. Панов, А.Н. и др. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / Панов А.Н., Осмола И.И., Шкадрцов И.В., Ловкис И.Б., Маринич Л.А.; под общ. ред. Панова А.Н. – Минск: БГАТУ, 2009. - 482 с.

[5]. Горбачевич, М.И. и др. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография / Горбачевич М.И., Панов А.Н., Минюкович С.М.; под общ. ред. Панова А.Н. – Минск.: «Технопринт», 2005. - 264 с.

[6]. Панов, А.Н. Фракталы и аттракторы нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организаций. Эффективное планетарное развитие машиностроения в парадигме рисков/ А.Н. Панов, Ж.А. Мрочек, В.М. Пашкевич// Вестник Белорусско-Российского университета - 2022- №4 (77). - С 35-47.

[7]. Проект ГОСТ 16949 «Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ISO 9001-2015 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения».

## Автоматизация риск-ориентированного проектирования техники

<sup>1</sup>Панов А.Н., <sup>2</sup>Ромашова Е.Ю., <sup>2</sup>Прибыльнов И.Л.

<sup>1</sup>ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия

a.panov@tut.by

romashova@imash.ru

Фундаментальные труды многотомного издания «Безопасность России», отраслевые исследования по применению риск-ориентированного подхода [1-5] позволили создать новую методологию и систему моделей: «вероятность-ущерб», «качество-цена», «вариация-ущерб»; шкала «значимость ущерба - вероятность»; «оптимизации затрат на управление рисками»; «измерительная система при риск-ориентированном подходе»; «интенсивность мгновенных отказов с учетом значимости приоритета»; «обеспечение надежности для невозстанавливаемой / восстанавливаемой продукции – нагруженность / деградация – время» и др.

Созданная методология обоснования соответствия объектов машиностроения для обеспечения приемлемых конструкторско-технологических рисков положена в основу разработки серии государственных, межгосударственных стандартов для риск-ориентированного проектирования и изготовления для автотракторного, сельскохозяйственного, подъемно-транспортного, карьерного и специального машиностроения.

Стандарты, основанные на риск-ориентированном подходе, широко используются в Белоруссии (БелАЗ, МАЗ, Минский тракторный завод, Гомсельмаш, Амкорд и др.) с 2018 г., в настоящее время разрабатываются и для применения в рамках ЕАЭС, СНГ, а также дружественных стран-партнеров (Китай и т.п.) в цепи поставок машиностроения.

В рамках разработанных стандартов (например, СТБ 16949, СТБ 2582, СТБ 1506 и др.) созданы новые виды: конструкторско-технологических документов («план управления рисками», «анализ рисков» и др.); технических характеристик (в дополнении к номинальному значению и полю допуска) – идентификатор значимости приоритета – величина интегрального ущерба последствий для конфигуратора – в случае отказа технической системы.

Применение стандартов, основанных на риск-ориентированном проектировании и изготовлении, позволяет на порядки снизить вероятность несоответствия и существенно - себестоимость техники. Использование методологии риск-ориентированного подхода обеспечит реализации стратегии достижения планетарной конкурентоспособности машиностроения, получить интегральную прибыль, как за счет снижения затрат на создание продукции на основе приоритизации требований, управления вариацией вероятностью отказов, так и за счет уменьшения «стоимости владения» для потребителей.

Требуется соответствующая автоматизация для повышения результативности и эффективности конструкторско-технологического проектирования при выполнении новых видов деятельности – обработки больших массивов данных. Примерами массивов данных являются: построение деревьев причинно-следственных связей отказов техники - «двояное дерево индукции-дедукции источников причин отказов и их последствий для конфигуратора»; идентификация приоритетности характеристик при декомпозиции иерархии сложной социотехнической системы - «машина – агрегат – сборочная единица – деталь – элемент детали – материал»; анализ рисков и синтез оптимальных конструкторско-технологических решений для достижения приемлемых величин конструкторско-технологических рисков.

Существующие и используемые в широкой практике системы автоматизированного проектирования не содержат требуемых алгоритмов и программного обеспечения для риск-ориентированного проектирования. Следует сформулировать соответствующие технические задания и реализовать соответствующие этапы подготовки для создания систем автоматизации риск-ориентированного проектирования, формирования баз знаний и баз данных.

[1]. Махутов, Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность/под общ.ред.Н.А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2018, – 1016 с.: ил.

[2]. Панов, А.Н. и др. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / Панов А.Н., Осмола И.И., Шкадрецов И.В., Ловкис И.Б., Маринич Л.А.; под общ. ред. Панова А.Н. – Минск: БГАТУ, 2009. – 482 с.

[3]. Горбачевич, М.И. и др. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография / Горбачевич М.И., Панов А.Н., Мишкокович С.М.; под общ. ред. Панова А.Н. – Минск.: «Технопринт», 2005. – 264 с.

[4]. Панов, А.Н. Фракталы и аттракторы нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организаций. Эффективное планетарное развитие машиностроения в парадигме рисков/ А.Н. Панов, Ж.А. Мрочек, В.М. Пашкевич// Вестник Белорусско-Российского университета - 2022- №4 (77). – с. 35-47.

[5]. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика. Кравченко И.Н., Пучин Е.А., Чепурин А.В., Фролов В.А., Олейник А.В., Ставровский М.Е., Пузряков А.В., Зубрилина Е.М., Ерофеев М.Н., Кулинич А.Н. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150100 "Материаловедение и технологии материалов" Сер. Технологический сервис. Москва, 2012.

## Разработка нормативной базы риск-ориентированного проектирования в машиностроении

<sup>1</sup>Панов А.Н., <sup>2</sup>Ромашова Е.Ю.

<sup>1</sup>ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия

a.panov@tut.by

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

romashova@imash.ru

Создание новых видов объектов машиностроения и обеспечение жизненного цикла техники не представляется возможным без оптимального упорядочивания повторяющейся деятельности – стандартизации и технического нормирования.

Международные (ИСО, МЭК), межгосударственные (ГОСТ) и государственные (ГОСТ Р, СТБ и т.д.) стандарты, являющиеся методической базой проектирования конструкций (ЕСКД), технологической подготовки производства (ЕСТП), документирования технологических процессов (ЕСТД), описания поддержания функционирования в эксплуатации (ЕСЭД) и восстановления (ЕСРД), а также обеспечения отдельных элементов, таких как надежность техники (ГОСТ серии 27.000), основываются на фундаментальной методологической базе – машиноведении. Машиноведение – является научной основой технического нормирования и стандартизации для машиностроения, производства материалов, начиная с требований к материалам и заканчивая сложными социотехническими системами.

Использование мышления на основе рисков, применяемых в международных методологических стандартах (ИСО 31000, ИСО 9001, МЭК 60300 и др.), а также фундаментальные труды и учебники для подготовки кадров в области машиноведения и риск-ориентированного подхода [1-4] создало основу для поэтапного перехода в машиноведении с парадигмы детерминированного, статистического, вероятностного и допускового мышления в машиностроении к стратегии развития риск-ориентированного подхода.

Создание новых видов продукции для достижения существенно малых вероятностей несоответствия (3-25 ppm), по сравнению с традиционными (3000 ppm), при одновременном глобальном усложнении социотехнических систем (в том числе со встроенным программным обеспечением, а также средствами производства для интеллектуальной деятельности) в условиях конструкторско-технологических рисков (событий, вариаций и бифуркаций) потребовало разработки методологических основ (системы моделей, методов) в машиноведении и методического обеспечения в машиностроении на основе рисков-ориентированного подхода.

Для поэтапного внедрения риск-ориентированного подхода при реализации проектов по созданию техники, проектирования и изготовления разработана серия государственных стандартов: СТБ В 15.004-2009 «Система разработки и постановки на производство оборонной продукции. Военная техника. Системы менеджмента качества. Требования»; СТБ 16949-2018 «Системы менеджмента качества. Особые требования по применению СТБ ISO 9001-2015 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения»; СТБ 2582-2020 «Системы менеджмента. Менеджмент проекта. Риск-ориентированное планирование качества продукции, услуг и процессов»; СТБ 2484 «Системы менеджмента. Менеджмент верификации и валидации в цепи поставок»; СТБ 1506-2015 «Системы менеджмента. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий потенциальных отказов»; СТБ 2450 «Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем»; СТБ 1505-2015 «Системы менеджмента. Менеджмент процессов. Методы статистического управления процессами».

Для создания цепей поставок в ЕАЭС, СНГ и дружественных стран – партнеров (Китай и т.д.) разработан проект межгосударственного стандарта – ГОСТ/ ПР 16949 «Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ISO 9001-2015 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения».

Использование методологии риск-ориентированного подхода позволяет обеспечить планетарную конкурентоспособность машиностроения, получить интегральную прибыль, как за счет снижения затрат на создание продукции на основе приоритизации требований и управления вероятностью отказов, так и за счет уменьшения затрат на эксплуатацию.

[1]. Махутов, Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / под общ. ред. Н.А. Махутова. – М.: МГОФ «Знание», 2018 – 1016 с.: ил.

[2]. Панов, А.Н. и др. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / Панов А.Н., Осмола И.И., Шкадрецов И.В., Ловкис И.Б., Маринич Л.А.; под общ. ред. Панова А.Н. – Минск: БГАТУ, 2009. – 482 с.

[3]. Горбачевич, М.И. и др. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография / Горбачевич М.И., Панов А.Н., Минюкович С.М.; под общ. ред. Панова А.Н. – Минск.: «Технопринт», 2005. – 264 с.

[4]. Основы стандартизации, сертификации и управления качеством. Кравченко И.Н., Гладков В.Ю., Бобрятков В.М., Горкунов В.Н., Ерофеев М.Н., Чепурин А.В., Гладкова М.А., Каменский А.А. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Технология обслуживания и ремонта машин в АПК" / Сер. Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений. Москва, 2010.

[5.] Технологическое обеспечение машиностроительного производства: учебное пособие / В.А. Логвин, Ж.А. Мрочек, Е.В. Банковская, С.А. Шептунов, А.Н. Панов.; под ред. Ж.А. Мрочка. – Минск: РИВШ, 2021. - 560 с.:

# Теоретическое обоснование и разработка манипуляционных механизмов совместного относительного манипулирования

Пащенко В.Н.

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

pashenkovn@inbox.ru

Работа посвящена исследованию и разработке механизмов совместного относительного манипулирования, представляющих большой научный и практический интерес [1-4].

Механизм совместного относительного манипулирования – пространственный механизм, включающий два последовательно соединенных модуля (механизма, воспроизводящего заданную траекторию, и механизма, определяющего ориентацию тела в подвижной системе координат и движение самой системы координат) обладающих определенным числом степеней свободы.

В качестве базовых механизмов рассматриваются три механизма совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы, структурные схемы которых представлены на рисунке 1.

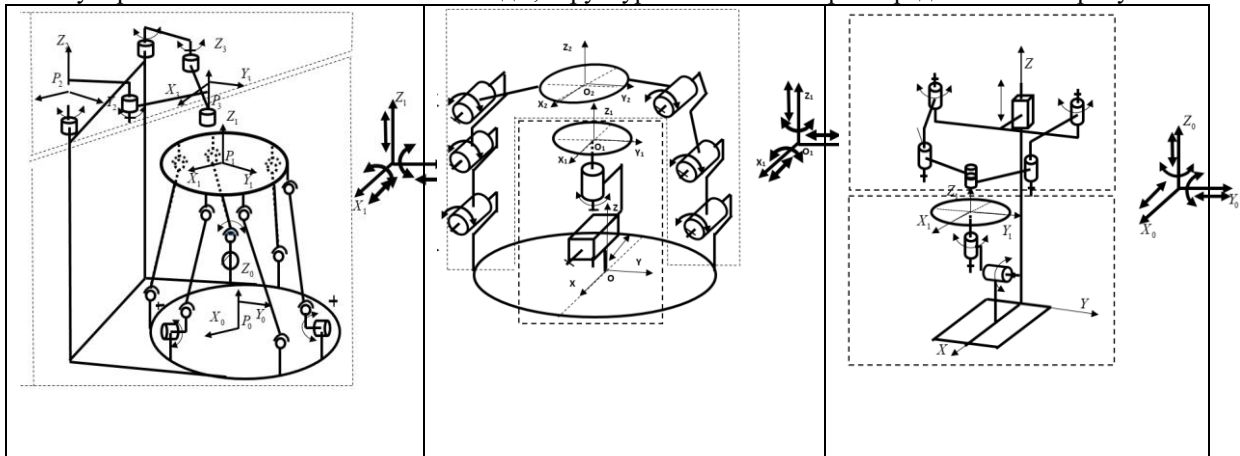


Рис. 1. Структурные схемы механизмов совместного относительного манипулирования

В рамках проведенной научно-практической работы, для рассматриваемых механизмов были поставлены и решены следующие задачи:

- Структурный синтез и анализ, данного типа механизмов;
- Решены прямые и обратные задачи о положениях;
- Проведена оценка точности решения задач о положениях;
- Поставлены и решены задачи определения рабочего пространства рассматриваемых механизмов;
- Поставлены и решены задачи определения особых положений механизмов, составляющих рассматриваемые механизмы;
- Решены задачи уменьшения особых положений рассматриваемых механизмов
- Предложена методика определения манипулятивности;
- Поставлена задача кинематического управления механизмами совместного относительного манипулирования и решены задачи для рассматриваемых механизмов;
- Решены задачи моделирования выходного звена рассматриваемых механизмов;
- Определены законы изменения скоростей и ускорений, рассматриваемых механизмов;
- Поставлены и решены задачи кинематической точности рассматриваемых механизмов;
- Построены динамические модели рассматриваемых механизмов на основе формализма Лагранжа;
- Решены задачи управления рассматриваемыми механизмами;
- Разработаны прототипы рассматриваемых механизмов
- Проведена экспериментальная проверка работоспособности разработанных механизмов.

[1] Glazunov, V.A., Lastochkin, A.B., Shalyukhin, K.A., Danilin, P.O.: Analysis and classification of relative manipulation devices. J. Mach. Manuf. Reliab. 38(4), 379–382 (2009)

[2] Pashchenko, V.N., Sharapov, L.V., Rashoyan, G.V., Bykov, A.I.: Construction of a working area for the manipulation mechanism of simultaneous relative manipulation. J. Mach. Manuf. Reliab. 46(3), 225–231 (2017).

[3] Pashchenko, V.N., Romanov A., Chaikin M., Zakharov V. Determination of special positions for solving the problem of joint-relative manipulation mechanisms kinematic control. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. T. 232. P. 25-36.

[4] Pashchenko, V.N., Artemyev, A., Antonov, A., ...Chernetsov, R., Ulyanov, E. Inverse dynamics problem solution for the combined relative manipulation mechanism with five degrees of freedom. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. T. 154. P. 253-363.

## Использование экспертных оценок при морфологическом анализе в машиностроении

*Печейкина М. А.<sup>1</sup>, Раков Д.Л.<sup>2</sup>, Сухоруков Р.Ю.<sup>2</sup>*

1- Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

2- Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
rdl@mail.ru

Основным этапом при проектировании новых технических систем (ТС) является этап технического предложения, на котором решаются задачи структурного синтеза и параметрической оптимизации. В частности, на этом этапе выполняются следующие основные работы [1]:

- Анализ технического задания. Изучение и анализ целей и задач создания новой технологии. Критический анализ конечной цели.

- Выявление вариантов возможных технических решений (ТР), определение особенностей вариантов (принципов работы, размещения функциональных компонентов и т.д.), их конструкторская проработка. Глубина такой проработки должна быть достаточной для сравнительной оценки рассматриваемых вариантов.

- Сравнительная оценка рассматриваемых ТР. Такое сравнение проводится по техническим и технологическим параметрам ТР, по показателям качества изделия (надежность, экономические, эстетические, эргономические требования) и показателям стандартизации и унификации.

Как результат данного этапа выбирается оптимальное ТР с обоснованием этого выбора. На данном этапе ошибка в определении ТР не может быть или может быть с большими затратами исправлена на последующих этапах. В результате необходимо просмотреть как можно большее множество вариантов ТР, число которых в случае сложных ТС может достигать нескольких тысяч. Для инновационных ТС стадия предпроектных и проектных исследований полностью определяет облик синтезируемых ТС и оказывает влияние на ход выполнения проекта. Следовательно, необходимо и актуально внедрять методики и программные средства, повышающие надежность выбора и качество получаемых результатов.

Предложенная методика и программное обеспечение разрабатывалась с целью: помочь экспертам исследовать и анализировать разнообразные сочетания структурных элементов объекта исследования. Как результат увеличивается вероятность, что синтезированные ТР будут наилучшими по ряду показателей и целевой функции. Разработанный подход рассматривается как развитие методов морфологического анализа [2,3].

Основатель морфологического метода Ф.Цвикки дал следующую формулировку: "Цель морфологического исследования – увидеть перспективу полного "поля знаний" о предмете" [2]. Морфологические подходы используются при изучении сложных предметных областей. Такие подходы наиболее рациональны для решения задач, когда невозможно или трудно дать точную и корректную математическую формулировку.

В предлагаемом морфологическом методе исследования проводятся в следующей последовательности [4-6]: 1) синтез морфологической матрицы; 2) определение системы критериев; 3) взвешивание вариантов; 4) выбор опорных ТР; 5) генерация вариантов; 6) выбор вариантов; 7) кластеризация вариантов на основе меры сходства и создание пространства решений; 8) анализ кластеров и ТР; 9) анализ рисков, вариантов и выбора; 10) синтез прогностических моделей, параметрическое моделирование и этап оптимизации.

Особое внимание уделено процедурам учета мнения экспертов. Особенности предложенного подхода заключаются в учете всех потенциальных вариантов решений, синтезированных экспертами. Впоследствии множество решений кластеризуется и сравнивается. Введение средних нормированных оценок позволяет анализировать как экспертов по отдельности, так и всю группу в целом.

При помощи предложенного подхода был проанализирован ряд ТР и перспективных технологических процессов [7,8]. Использование подхода позволило увеличить число рассматриваемых ТР и следовательно повысить эффективность выбора ТР.

[1]. ГОСТ 2.118-2013 Единая система конструкторской документации. Техническое предложение.

[2]. Zwicky F. Discovery, Invention, Research – Through the Morphological Approach. Toronto: The Macmillan Company, 1969.

[3]. Ritchey T. General morphological analysis as a basic scientific modelling method // Technological Forecasting and Social Change. 2018. Vol. 126. P. 81.

[4]. Rakov D. Consideration of Expert Judgement by the Morphological Matrix Formation. Advances in Artificial Systems for Medicine and Education Vol. 2022. P. 144.

[5]. Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. Формирование экспертных оценок при морфологическом анализе в машиностроении. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 1. С. 136-143

[6]. Bardenhagen A., Pecheykina M., Rakov D. Advanced morphological approach for knowledge-based engineering (KBE) in aerospace. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. T. 902. С. 495-505.

[7]. Rakov D., Sukhorukov R. Analysis and prospects for the development of additive technologies for metal products. Conference proceedings. proceedings of the international conference on the physics and technology of advanced materials. (PTAM - 2021). 2022. С. 020038.

[8]. Rakov, D., Sukhorukov, R. Analysis and prospects for the development of additive technologies for metal products. AIP Conference Proceedings. 2022. 2533, 020038.

## Формирование управляющей программы абразивной обработки пера лопаток ГТД при условии увеличения контактной области с инструментом

Смоленцев А.Н., Афонин В.Л., Гаврилина Л.В.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия  
alexeisml@rambler.ru

Траектория абразивной обработки сложной поверхности детали должна обеспечивать равномерность износа режущей поверхности инструмента, чтобы увеличить его срок службы. Кроме того, желательно повысить производительность обработки. Эти две задачи решаются увеличением области контакта детали и инструмента в процессе вычисления их относительных положений, образующих программную последовательность перемещений.

Размер контактной области (пересечения режущей поверхности инструмента и снимаемого слоя припуска) зависит от положения инструмента относительно детали, которое определяется как матрица [1] преобразований координат  ${}^dA_u$ . Это положение, как правило, находится из матричного уравнения

$${}^dA_u(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = {}^dA_k {}^uA_k^{-1}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (1)$$

где матрица  ${}^dA_k$  определяет заданное положение режущей кромки инструмента на поверхности детали. Матрица  ${}^uA_k$  определяет положение режущей кромки на режущей поверхности инструмента в его системе координат, связанной с корпусом электрощинделя.

Положение режущей кромки на конической режущей поверхности выражается через три координаты:  $\theta_1$  - поворот режущей кромки вокруг оси инструмента;  $\theta_2$  - линейная координата вдоль образующей,  $\theta_3$  - угол между соответствующими главными направлениями кривизны касающихся поверхностей.

Для каждого кадра управляющей программы вычисляется  ${}^dA_u$  (1) и приводные координаты. Координата  $\theta_1$  не влияет на размер контактной области, может использоваться как дополнительная переменная [1, 2] при решении обратной задачи о положении, а диапазон координаты  $\theta_2$ , как правило, небольшой.

Увеличение области контакта детали и инструмента производится в основном за счёт выбора оптимального значения координаты  $\theta_3$ , которая влияет на минимальную разность кривизны поверхностей в нормальном сечении. В первом приближении размер области контакта определяется этой разностью кривизны. Значения угла  $\theta_3$  определялись по формуле из [3] в случае разных по знаку главных значений кривизны поверхности детали и приравнялись  $\pi$  в остальных случаях. Формирование управляющей программы производится совместно с моделированием процесса формообразования поверхности детали.

Моделирование проводилось поэтапно: аппроксимация поверхности по исходному множеству точек полиномом известным методом наименьших квадратов, расчет массивов главных значений кривизны для спинки и корыта, определение равномерно распределённых по поверхности спинки или корыта поперечных траекторий, для каждой точки этих траекторий вычисление координаты  $\theta_3$ , а  $\theta_2$  соответствовала середине образующей. По  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  (1) и из аппроксимирующего полинома через  ${}^dA_k$  определялось  ${}^dA_u$ . Положения конического инструмента относительно детали  ${}^dA_u$  корректировались путем вычисления глубины наибольшего погружения исходных точек в инструмент для каждого отдельного его положения и в соответствии с этой глубиной оно отодвигалось по нормали. За две такие корректирующие итерации устранялся возможный подрез. Окончательная проверка результата формообразования: для каждой исходной точки обрабатываемой поверхности проводилось вычисление её кратчайшего приближения к инструменту (для всех вычисленных дискретных положений режущей поверхности). Это и принято за оценку оставшейся толщины необработанного слоя.

Максимальное отклонение при аппроксимации поверхности пера лопатки длиной 50 мм, числе точек исходных данных 2465 и десятом порядке полинома для спинки составила 0.016 мм, а для корыта 0.009 мм. При моделировании обхода спинки 8-ю поперечными траекториями и корыта также 8-ю, вычисленная оценка толщины необработанного слоя составила не более 0.03 мм, за исключением переходных участков между спинкой или корытом и кромками, а также небольших концевых участков поверхностей.

Проверка моделированием показала возможность применения на практике предлагаемого способа, однако для краевых областей спинки и корыта могут потребоваться продольные траектории и вычисление  $\theta_3$  при заданных ограничениях или при заданной контактной области.

[1]. Афонин В.Л., Смоленцев А.Н., Панфилов А.Н. Анализ кинематических характеристик робота-станка при введении дополнительных неуправляемых координат. Проблемы машиностроения и автоматизации, 2014, №4, с. 63-69.

[2]. Афонин В.Л., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кондратьев И.М., Морозов С.В., Раков Д.Л., Смоленцев А.Н., Сухоруков Р.Ю., Шитов А.М. Исследования и разработка инновационных технологических процессов и интеллектуальных систем управления для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Москва, 2019, 137 с.

[3]. Афонин В.Л., Смоленцев А.Н., Гаврилина Л.В. Разработка технологии автоматизированного выполнения финишных операций обработки сложнопрофильных поверхностей деталей ГТД с использованием промышленных роботов (Интеллектуальные технологические комплексы для финишной обработки пера лопаток ГТД). Отчет о НИР. Актуальные проблемы робототехники. Программа фундаментальных исследований Президиума (отделения) РАН. Номер государственной регистрации АААА-А18-118011890132-7, инв. № АААА-А18-218022190112-1 от 21.02.2018. 91 с.

# Рациональный подход к выбору значений конструктивных параметров проектируемых машиностроительных Конструкций

Статников И.Н., Фирсов Г.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
firsovgi@mail.ru

Начиная со второй половины XX века центр тяжести в решении задач проектирования машиностроительных конструкций перемещается в сторону использования математических моделей функционирования объекта, т.е., идеологии математического моделирования. При этом эффективность решения задачи с помощью математической модели зависит от степени адекватности используемой модели реальному процессу функционирования исследуемого (или проектируемого объекта). Из арсенала используемых при указанном подходе математических методов очень полезными оказались методы семейства Монте-Карло, к которому относится разработанный в ИМАШ РАН ПЛП-поиск [1 - 5], важным свойством которых является возможность получения «неограниченного» объема численной информации при отсутствии частичного или полного предварительного знания о свойствах критериев качества проектируемой машиностроительной конструкции как функций конструктивных параметров  $\alpha_j, j = \overline{1, J}$  от каждого  $k$ -го критерия  $\Phi_k(\bar{\alpha}), k = \overline{1, K}$ .

В основе ПЛП-поиска положена рандомизация расположения векторов  $\bar{a}$  в заданной области  $G(\bar{\alpha})$ , задаваемой неравенствами типа  $\alpha_{j*} \leq \alpha_j \leq \alpha_{j**}$  ( $j = \overline{1, J}$ , а само  $J$  - число варьируемых параметров) и рассчитываемых с помощью модифицированных ЛПТ-сеток [6]. На сегодняшний день в ПЛП-поиске используются величины  $J \leq 51$ . Процесс рандомизации расположения векторов  $\bar{a}$  в области  $G(\bar{\alpha})$  состоит в случайном смещении уровней параметров  $\alpha_{ijk}$  тем или иным способом, где  $i = \overline{1, M(j)}$  - номер уровня, а  $M(j)$  - число уровней варьируемого  $j$ -го параметра по  $k$ -му критерию;  $h = \overline{1, H_{ijk}}$ , а  $H_{ijk}$  - число значений  $k$ -го критерия  $\Phi_k(\bar{\alpha})$  на  $i$ -м уровне  $j$ -го параметра;  $k = \overline{1, K}$  - номер критерия, где  $K$  - количество критериев качества. В результате обработки всех вычислительных экспериментов, проведенных на математической модели, появляются выборочные множества значений  $\{\bar{\Phi}_{ijk}(\alpha_{ij})\}$ , где  $\bar{\Phi}_{ijk}(\alpha_{ij})$  - среднее значение  $k$ -го критерия качеств в  $i$ -м сечении  $j$ -го варьируемого параметра. Естественно рассматривать множество значений  $\{\bar{\Phi}_{ijk}(\alpha_{ij})\}$  как аналог чувствительности в среднем критерия  $\Phi_k(\bar{\alpha})$  к изменениям параметра  $\alpha_j$  при возможных сочетаниях значений других варьируемых параметров в заданной области  $G(\bar{\alpha})$ . Вероятностная основа ПЛП-поиска при заданной вероятности  $P_{\text{зад}}$  позволяет:

а) разделить все параметры  $\alpha_j$  в математической модели на влияющие и не влияющие на значения каждого критерия  $\Phi_k(\bar{\alpha})$  в смысле искомого экстремума;

б) по итогам п. «а» аналитически и визуально с помощью построенных программным путём для каждого  $k$  выборочных функций чувствительности выделить в исходной области подобласти концентрации лучших решений по каждому критерию;

в) и, наконец, учитывая результаты анализа в п.п. «а» и «б», выделить области компромиссных решений, по существу, наиболее рациональных для проектируемой машиностроительной конструкции.

Возможность определения влияющих параметров на критерии качества с требуемой достоверной вероятностью, в значительной мере решают проблему интегрирования огромной численной информации, полученной в эксперименте, в ясные и поддающиеся логическому анализу характеристики.

Изложенный подход иллюстрируется на примерах синтеза многозвенного рычажного механизма, проектирования зубчатой передачи, выбора рациональных параметров системы шумозащиты технологического оборудования, синтеза колебательной системы швейной машины по критериям минимальных динамических нагрузок при ограничениях на относительные перемещения исполнительных органов, пневморегулятора давления повышенной точности, выбора параметров пневмовстрягивающей машины и трансмиссии главного привода рабочей клетки прокатного стана,

[1] Statnikov I.N., Firsov G.I. Processing of the Results of the Planned Mathematical Experiment in Solving Problems of Research of Dynamics Machines and Mechanisms. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE Xplore. 2018. P. 1-6.

[2] Statnikov I., Firsov G. Numerical approach to the solution of the problem of rational choice of dynamical systems. Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. Ed. by Hu Z., Petoukhov S., He M. Heidelberg: Springer International Publishing, 2020. P. 69-79.

[3] Statnikov I., Firsov G. Estimation of the number of calculations for solving the tasks of optimization synthesis of dynamic systems by the method of a planned experiment. Advanced Technologies in Robotics and Intelligent Systems. Proceedings of ITR 2019. Ed. by Misyurin S.Yu., Arakelian V., Avetisyan A.I. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG 2020. P. 149-156.

[4] Статников И.Н., Фирсов Г.И. Проблемы алгоритмизации и обработки результатов планируемого вычислительного эксперимента в механике машин. Вестник научно-технического развития. № 166, 2022. С. 33-51.

[5] Statnikov I.N., Firsov G.I. Algorithmization of computational experiment planning based on Sobol sequences in the tasks of dynamic systems research. Advances in Artificial Systems for Medicine and Education IV. Ed. by Hu Z., Petoukhov S., He M. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 86-93.

[6] Statnikov I.N., Firsov G.I. Using sobol sequences for planning experiments. Journal of Physics: Conference Series. V. 937. 2017. P. 1-3.



## Синтез главных рабочих механизмов кривошипных прессов

Тулешов А.К., Куатова М.Ж., Тулешов Е.А.

Институт механики и машиноведения им У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

Целью является структурный синтез схем шестизвенных рычажных механизмов с поступательной парой для создания атласа схем, из которых конструктор имел возможность выбрать подходящую схему для проектируемого главного рабочего механизма (ГРМ) кривошипных прессов (КП).

Для решения задачи структурного синтеза ГРМ используется принцип Грюблера [1]. В качестве исходной кинематической цепи на основе цепи Стефенсона [1,2] обоснованно определены всего три варианта (рис. 1).

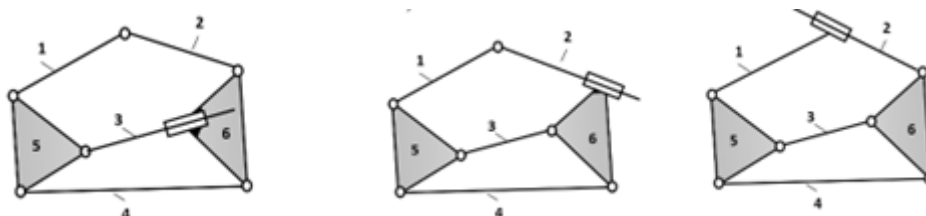


Рис.1. Исходные кинематические цепи для синтеза ГРМ КП

Согласно принципу Грюблера [1,2] на базе кинематической цепи  $W_{Ц} = 4$  можно образовать структуру плоского механизма с одной степенью свободы  $W = 1$ , если одно звено цепи закрепить, т.е. сделать стойкой. Синтез ГРМ кривошипных прессов имеет следующие дополнительные условия [2]:

- 1) необходимо синтезировать структуру механизма с минимальным числом звеньев;
- 2) рабочие звенья (ползуны) ГРМ составляют пару со стойкой;
- 3) наличие в структуре ГРМ минимум одного кривошипа для обеспечения полного цикла.

Решение задачи структурного синтеза всевозможных шестизвенных ГРМ с одним и двумя рабочими ползунами представлены в табл. 1.

Таблица 1. Структурные схемы синтезированных шестизвенных ГРМ КП

На базе КЦ рис.1,б	 а	 б	 в
На базе КЦ рис.1,г	 г	 д	 е
На базе КЦ рис.1, д	 ж		

Таким образом данные структуры являются единственно возможными вариантами шестизвенных механизмов КП с минимальным числом звеньев, которые можно построить на базе цепи Стефенсона. Были проведены исследования кинематика ГРМ КП на основе этих структур.

Работа выполнена в рамках грантового финансирования КН МНВО РК (код проект № AP19577094).

[1]. Вульфсон И.И., Ерихов М.Л., Коловский М.З., Пейсах Э.Е. и др. Механика машин /под ред. Смирнова Г.А. - М.: Высш. шк., 1996. -511 с.

[2]. Тулешов А.К., и др. Кривошипные рычажные прессы на основе механизма Стефенсона II: Монография, ISBN978-601-332-973-4, Алматы, 2020. -240 с.

## Интенсивная пластическая деформация дисков газотурбинных двигателей из суперсплавов методом давления с кручением в изотермических условиях

<sup>2</sup>Утяшев Ф.З., <sup>1</sup>Сухоруков Р.Ю., <sup>1</sup>Гаврилина Л.В., <sup>1</sup>Ибрагимова Н.А.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благодирова РАН, Москва, Россия

labutps@yandex.ru

<sup>2</sup> Уфимский университет науки и технологий УУНиТ, Уфа, Россия;

Результаты фундаментальных и прикладных исследований процессов интенсивной пластической деформации изделий из суперсплавов, а также наличие патентов на технологию и оборудование позволили научно обосновать возможность применения более технологичного процесса - деформации жаропрочных сплавов методом давления с кручением в изотермических условиях, не уступающего по качеству и надежности в сравнении с существующими технологиями.

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) – давление с кручением создает ротационную составляющую деформации, что приводит к непрерывному изменению ориентации тензора деформации, которая становится немонотонной. Структурообразование при этом определяется длиной и кривизной траектории деформации. Длина определяет степень деформации, необходимой для образования множества границ деформационного происхождения, а кривизна приводит к пересечению этих границ и образованию сетки большеугловых границ мелких зерен. При накоплении деформации такие границы набирают большеугловые разориентировки, а их пересечения образуют микрoзерна, что важно для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры суперсплава. Поэтому необходимо рационально использовать изотермическую деформацию в температурно-скоростном режиме сверхпластичности и определить вклады в неё «сдвиговой» и ротационной составляющих.

Для оценки вкладов компонент деформации «сдвиговой» и ротационной рассмотрим диаграмму деформирования и варианты траекторий, полученные при различных соотношениях  $e_2/e_1 = k$ , где  $e_1$  - степень осевой деформации, с ординатой  $e_2$  – степень ротационной деформации.

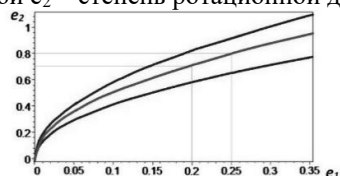


Рис. 1 - Траектория деформации при давлении с кручением (осадкой) или с растяжением при  $k = 1$  (верхняя),  $k = 2$  (средняя),  $k = 3$  (нижняя).

Показано, что при  $k = 2$  даже после небольшой осевой деформации  $e_1 = 0.2-0.25$  ротационная составляющая достигает значения  $0.65-0.8$ .

Изучение механизма интенсивной пластической деформации методом давления с кручением позволило получить аналитические зависимости для расчета основных энергосиловых параметров и условий реализации процесса с учетом реологических свойств материала диска [1].

Предложена конструкция штампа, которая может быть использована совместно с серийным прессовым оборудованием для реализации комбинированного метода при изготовлении дисков для газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов (патент № 216591 от 14.02.2023 г. «Изотермический штамп для деформирования дисков газотурбинных двигателей») [2].

Разработана система управления прессом, погрузочно-разгрузочным механизмом (роботом) и приводами механизмов штампа, показана реализация последовательности техпроцесса, синхронизации по программе величины и скорости (осевого) усилия пуансона пресса и величины крутящего момента, скорости вращения донной части матрицы штампа, которые задаются приводом червячной передачи, а также поддержание температурно-скоростного режима путем индукционного нагрева заготовки в штампе.

Использование предлагаемого технического решения позволит изготавливать штампы, которые упрощают процесс горячего деформирования различных дисков, в том числе дисков с «тонким полотном» из заготовок с различной структурой: крупнозернистой, литой, порошковой.

Результатом исследований является повышение эффективности процесса горячей деформации дисков за счет снижения трудоемкости и однопереходной операции, связанных с использованием серийного оборудования и изотермического штампа, а также за счет накопления в заготовке (интенсивной) однородной деформации и формирования однородной УМЗ структуры.

[1]. Утяшев Ф.З., Сухоруков Р.Ю., Валитов В.А., Теоретические основы использования интенсивной пластической деформации для формирования ультрамелкозернистой структуры в суперсплавах, Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 3. С. 72-79.

[2]. Утяшев Ф.З., Сухоруков Р.Ю. Механика интенсивной пластической деформации в процессах измельчения зерен в суперсплавах // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 504. С. 66-72.

## Использование поляризационных методов для анализа колебательных траекторий деталей машин

Фирсов Г.И.

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

firsovgi@mail.ru

Каждая движущаяся точка колеблющегося тела последовательно занимает различные положения в пространстве. Совокупность этих положений за конечный отрезок времени определяет некоторую линию или фигуру (траекторию), которая содержит ценную информацию о характере движения, об особенностях колебательной системы и внешних воздействиях [1]. Анализ траектории облегчает выбор адекватного математического описания колебательной системы в задачах моделирования колебаний, а при решении ряда практических задач позволяет разработать рекомендации по совершенствованию конструкции с целью обеспечения требуемого режима работы. Вследствие действия различных источников вибрации и неоднородности конструкции машины энергия взаимодействия между двумя наблюдаемыми процессами колебаний может существенно отличаться в разные моменты времени и на разных частотах. В общем случае плоское движение точки в различных направлениях оказывается различным, и исследуемая траектория может быть разложена на две субтраектории - полностью поляризованную и полностью неполяризованную. Полностью поляризованная траектория отображается характерной ориентированной линией, фигурой или регулярно повторяющимися фигурами вследствие, например, корреляции суммируемых колебательных процессов. Наличие даже слабой корреляции из-за связанности колебаний порождает определенные закономерности в изображении частично поляризованной траектории в виде некоторой фигуры, например, эллиптического или кругового кольца, или размытой прямой линии. Неполяризованная траектория определяется несвязанными колебаниями равного уровня и поэтому вместо характерной формы дает случайное сплошное круговое заполнение участка плоскости.

Для количественной оценки параметров поляризованной части траектории удобно перейти от вещественных колебательных процессов к соответствующим комплексным (векторным) представлениям, например, в виде аналитических сигналов (АС):

$$X(t) = x(t) + jx_r(t), Y(t) = y(t) + jy_r(t),$$

где  $x_r(t)$ ,  $y_r(t)$  - процессы, преобразованные по Гильберту [2]. Одно из наиболее известных представлений частично поляризованной траектории основано на корреляционной матрице  $J$ , состоящей из математических ожиданий попарных произведений АС. Диагональные элементы  $I_{xx}$  и  $I_{yy}$  корреляционной матрицы действительны и представляют собой дисперсии процессов в направлениях  $x$  и  $y$ , поэтому след матрицы  $J$  определяет след траектории на плоскости  $spJ$ . Недиagonальные комплексно сопряженные элементы  $I_{xy}$  и  $I_{yx}$  определяются взаимной корреляцией между  $x$ - и  $y$ -компонентами; детерминант матрицы  $J$   $detJ$  имеет положительную действительную величину. След поляризованной части траектории определяется выражением

$$I_n = (sp^2J - 4detJ)^{1/2}, 0 \leq I_n \leq spJ,$$

откуда можно получить величину степени поляризации траектории  $P$ . Для полностью поляризованной траектории  $P = 1$ , для деполаризованной  $P = 0$ . Большие значения степени поляризации соответствуют большему стягиванию кольцевидной траектории в одну линию, имеющую форму, например, эллипса, круга или прямой. Для более детального исследования инерционной связи двух колебательных процессов и описания траектории точки, участвующей одновременно в двух ортогональных частично когерентных движениях, заданных в форме АС:  $X(t)$  и  $Y(t)$ , вводится понятие поляризационной переменной (ПП)  $\chi(t)$ , определяемой как отношение данных аналитических сигналов. Когда плоское движение представлено двумя когерентными колебаниями вдоль двух ортогональных направлений то, в общем случае полностью поляризованная траектория в каждый момент времени имеет форму эллипса. Ориентация эллипса в его собственной плоскости, азимут, эллиптичность, форма, направление обхода, размеры осей и площадь эллипса в каждый момент времени определяются модулем и разностью фаз ПП. Для определения динамической поляризации в виде амплитудно-фазовой частотной характеристики целесообразно воспользоваться методами спектрального анализа. В результате получаем возможность оценить действительную и мнимую части динамической поляризации с последующим определением спектров параметров эллипса поляризации. Изложенный метод использовался для анализа динамической погрешности позиционирования промышленного робота, позволившего выявить частоты колебаний, на которых сосредоточена основная энергия колебаний, а эллипс поляризации имеют максимальную площадь. Практически постоянные величины азимута ( $15^\circ$ - $20^\circ$ ) и эллиптичности ( $-0,1 \pm 0,2$ ) ЭП на этих частотах позволяют сделать вывод, что спектральное разложение динамической погрешности позиционирования дает одинаково ориентированные эллипсы движения, отличающиеся лишь своими размерами. При этом большая ось эллипса поляризации располагается перпендикулярно линии движения схвата робота при подходе к номинальной точке. Степень поляризации траекторий вследствие высокой корреляции движений схвата по обоим направлениям составляла  $0,4 - 0,7$ .

[1]. Фирсов Г.И. Оценка погрешностей идентификации параметров динамических систем по свободным колебаниям. Новые материалы и перспективные технологии. Том 1. М.: Центр научно-технических решений, 2020. С. 1012-1017.

[2]. Feldman M., Braun S. Nonlinear vibrating system identification via Hilbert decomposition. Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 84. Part B, p. 65-96.

## Разработка задающих устройств для робот-ассистированной хирургии

Шалюхин К.А.

e-mail:constmeister@gmail.com

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

Известно об использовании огромного количества механизмов для манипуляции различными материальными объектами, в энергетике, машиностроении, транспорте, здравоохранении, научных экспериментах, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, [1],[2]. Одновременно с проектированием манипуляторов, контактирующих непосредственно с целевым объектом, идет создание новых задающих устройств. Последние взаимодействуют с человеком, осуществляющим прямое управление процессом при работе в режиме телеманипулятора, или при необходимости вмешательства оператора в процесс, осуществляемый в полуавтоматическом режиме.

В малоинвазивной хирургии робототехнические системы применяются как в качестве основного средства проведения операции [3] так и для вспомогательных задач, как то управление камерой эндоскопа [4].

Специалистами ИМАШ РАН разрабатываются различные задающие устройства для пространственных механизмов разного назначения [5]. Для управления механизмами с удаленным центром вращения, применяемыми в лапароскопии, в частности, разработаны конструкции имитирующие ручной инструмент хирурга.

Один из них, изображенный на рисунке 1а основан на принципе геометрического подобия механизму манипулятора и имеет четыре степени свободы. Управление производится с помощью рукоятки, расположенной в области, соответствующей зоне операции. Задающие сигналы трех угловых и одной линейной координаты выдаются двумя потенциометрами и двумя энкодерами.



а)

б)

Рис.1 Задающие устройства, имитирующие инструмент хирурга.

Конструкция другого механизма (рисунок 1б), имитирует стандартную рукоятку лапароскопического инструмента, и имеет те же четыре степени свободы: три угловых и одну линейную, снимаемых с одного движкового и трех вращательных потенциометров. В дополнение имеется датчик логического сигнала для управления зажимом или ножницами.

Проведенное тестирование данных задающих устройств привело к следующим выводам:

Практика применения показала удобство и простоту обучения управлению манипулятором, благодаря сходству с реально существующими ручными инструментами

Важнейшими характеристиками задающих устройств остаются стабильность, помехоустойчивость и надежность работы механических и электронных компонентов конструкции.

Обязательно уделять внимание эргономике задающих устройств, включающей удобство и возможности адаптации к потребностям человека, интуитивно понятную логику использования, принципы управления, направленные на облегчение труда оператора, снижение утомляемости и комфортные условия пользования.

[1] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, роботехника // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2018. - № 5. - С. 16-25.

[2] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Скворцов С.А. Ассистирующие роботехнические комплексы для малоинвазивных операций // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2022. - № 3. - С. 83-94.

[3] C.Freschi, V.Ferrari, F.Melfi, V.Ferrari, F.Mosca, A.Cuschieri Technical review of the daVinci surgical telemanipulator The International Journal Of Medical Robotics And Computer Assisted Surgery 2013; 9: pp.394-406

[4] Y.Ohmura, M.Nakagawa, H.Suzuki, K.Kotani, A.Teramoto Feasibility and Usefulness of a Joystick-Guided Robotic Scope Holder (Soloassist) in Laparoscopic Surgery. Visceral Medicine 2018;34:37-44

[5] Алешин А.К., Антонов А.В., Глазунов В.А., Демидов С.М., Ращоян Г.В., Скворцов С.А., Терехова А.Н., Шалюхин К.А., Шептунов С.А. Пространственный механизм с шестью степенями свободы. Патент на полезную модель RU 182946 U1, 06.09.2018.

*Секция №7*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических направлений развития вибрационной биомеханики.**

**Председатель – Соловьев В.О., д.т.н.**

**Секретарь – Никифоров А.Н., к.т.н., [n.andre@mail.ru](mailto:n.andre@mail.ru)**

## Колебания систем с динамически-фрактальной структурой

Банах Л.Я.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
banl@inbox.ru

В природе и технике многие системы имеют фрактальную структуру, в которой каждая последующая ячейка в определенном масштабе повторяет структуру предыдущей. Цель настоящей статьи - исследование колебаний в таких системах. Для этого в работе вводится понятие динамического фрактала. Его отличие от геометрических фракталов [1] состоит в том, что предполагается масштабирование не только упругих, но и инерционных параметров каждой ячейки структуры [2], что является необходимым при проведении динамического анализа. Подобные конструкции известны в инженерной практике, как, например: стержни ступенчатого сечения, роторы барабанного типа, винтовые пружины, конические оболочки с оребрением. некоторые виды метаматериалов.

Проанализированы динамические свойства такого класса структур, показано, что они имеют волновое решение. Исследуемые структуры представляют собой полосовой частотный фильтр и имеют строго определенную полосу пропускания гармонического сигнала, ширина которой зависит от коэффициента масштабирования  $\gamma$  и упруго-инерционных параметров. Вне этой полосы гармонические колебания невозможны.

При коэффициенте масштабирования  $\gamma > 1$  фрактальная структура увеличивается по длине. В этом случае происходит уменьшение входного сигнала, что важно для систем виброизоляции. При  $\gamma < 1$  фрактальная структура уменьшается по длине и входной сигнал увеличивается, что может быть использовано в системах регулирования. Применение этих свойств проиллюстрировано на примере некоторых механических и биомеханических динамически-фрактальных структур.

Рассматривается система виброизоляции как фрактальная решетка, увеличивающаяся по длине ( $\gamma > 1$ ), ее фрагмент представлен на рис.1. Проведено сравнение эффективности виброгашения фрактальной и периодической решеток, имеющих одинаковые массы и парциальные частоты. Показано существенное снижение уровня колебаний фрактальной решетки по сравнению с периодической (в нашем примере примерно на 30%).

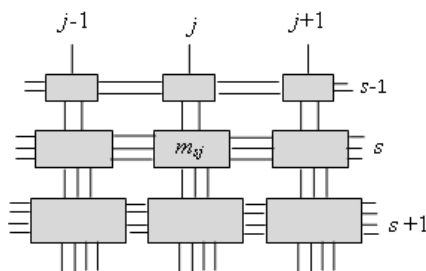


Рис. 1. Динамически-фрактальная виброизолирующая решетка

Свойство уменьшающегося по длине динамического фрактала усиливать входной сигнал используется, в частности, в биомеханических системах. Рассмотрен виброрецептор тела человека (тельце Пачини), который улавливает внешнее вибрационное воздействие, действующее на человека. Динамическая модель рецептора может быть представлена в виде цилиндрических оболочек, вложенных одна в другую, между которыми находится слой физиологической жидкости. Внутренняя оболочка соединена с нервным окончанием. Это «уменьшающийся» по длине динамический фрактал и поэтому в нем происходит усиление сигнала от внешнего воздействия, который и передается на нервное окончание. Найдена полоса пропускания гармонического сигнала, что определяет функциональные возможности данного рецептора.

Исследованы также разветвленные динамические фракталы типа дихотомической решетки. К ним, в частности относятся некоторые схемы трубопроводов [3], биомеханические структуры (например, ветвление аорты). Найдены условия динамической фрактальности разветвленных структур. Построены формы колебаний. Показано, что такие структуры имеют кратные собственные частоты большой кратности, при которых происходит интенсивные колебания всех элементов, что может привести к разрушению системы. Найдена полоса пропускания гармонического сигнала в аналитическом виде в зависимости от упруго-инерционных характеристик и коэффициента масштабирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного фонда (код проекта 21-19-00813).

[1]. Mandelbrot B. Fractal Geometry of Nature. New York, W.H. Freeman. 1982. 656 с.

[2]. Banakh L. Oscillations properties of the dynamic fractal structures. Journal of Sound and Vibration, 2022.Vol.20. P.116541. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116541

[3]. Черноушко Ф.Л. Оптимальная структура ветвящихся трубопроводов // Прикладная математика и механика. Т.41, вып. 2, 1977. С.376-38.

## Методы для оптимизации управления автотранспортными потоками в дорожной сети с регулируемыми перекрестками

Валуев А.М., Соловьев А.А.

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

valuev.online@gmail.com

Регулируемые перекрестки являются основным объектом приложения средств управления дорожным движением и, в то же время, наиболее проблематичными элементами городской дорожной сети в отношении проявления в них факторов неопределенности динамики транспортных потоков. Кроме того, структуры перекрестков, т.е. системы разрешенных путей через них и их взаимное расположение, чрезвычайно разнообразны по сравнению с ограниченным набором регулярных структур, рассматриваемых в технической научной литературе [1, 2]. Организация дорожного движения на перекрестке предусматривает пересечение, слияние и разветвление дорожных полос на перекрестке, в связи с чем появляются конфликтные точки. Однако разделение маршрутов проезда регулируемого перекрестка между фазами светофорного цикла – схема пофазного разъезда (СПР) делает точки пересечения и большинство точек слияния (или все) неактивными, проезжаемыми на каждой фазе только по одному маршруту. Такое разделение определено неоднозначно. Разработан алгоритм выявления всех бесконфликтных и условно-конфликтных СПР при ограничении на уровень конфликтности.

Нами развиваются методы управления перекрестком путем совместного выбора схемы пофазного разъезда и оптимизации светофорного регулирования. В детерминированном приближении при заданной СПР оптимальные продолжительности фаз при известной (требуемой) средней интенсивности транспортных потоков по направлениям движения находятся путем решения сформулированной задачи линейного программирования. При возможности выбора СПР предпочтительной является схема, для которой минимальный резерв пропускной способности по трассам максимален. Такой подход применим и к многосекционным перекресткам, на которых имеются внутренние стоп-линии и для каждой секции устанавливается собственный светофорный цикл.

Получаемые таким способом продолжительности фаз могут быть уточнены с учетом задержек, возникающих случайным образом, когда кластер транспортных средств (ТС), завершающий проезд по трассе, не успевает освободить конфликтную точку к моменту, когда ее достигает головное ТС следующей фазы. Учет таких эффектов позволяет уточнить продолжительности фаз и оптимизировать последовательность фазовых схем проезда в СПР и возможные временные сдвиги фаз для отдельных трасс.

Для решения перечисленных задач требуется знать зависимости среднего времени проезда  $N$  транспортных средств по каждой трассе (с учетом ее геометрии). Использование уточненных оценок предполагает знание вероятностных распределений времен достижения конфликтных точек. Для получения таких оценок недостаточно использовать лишь данные мониторинга дорожного движения, требуется выполнить имитационное моделирование движения по полосе как динамического процесса движения кластеров случайного состава.

Оптимизация светофорного регулирования на основе сформулированных подходов означает его адаптацию к текущей транспортной обстановке по средним интенсивностям транспортных потоков. В условиях наблюдаемого стохастического характера потоков эти величины устанавливаются приближенно, а неравномерность поступления потока ТС на входы и случайные колебания количества ТС, проезжающих по трассе за одну фазу, неизбежно приводят к колебаниям длин очередей перед стоп-линиями, вызывающим значительные задержки для части транспортных средств. Эти обстоятельства побуждают рассмотреть иной подход, основанный на использовании методов автоматического управления для светофорного регулирования на перекрестке. Такие методы требуют постоянного мониторинга локального транспортного потока, включая выявление моментов появления ТС на входах перекрестка и проезда ими выделенных локаций, включая стоп-линии и конфликтные точки. Современные технические средства, включая индукционные датчики, радары и установленные над потоком видекамеры, совместно с программными средствами обработки поступающей информации в реальном времени, позволяют своевременно получать и использовать необходимые данные.

Для задания конкретного метода автоматического (адаптивного) управления должен быть определен контролируемый показатель локального трафика. Набор возможных показателей включает максимальное и среднее количество ТС (они обозначаются МО, СО) в очередях по маршрутам отдельных фаз, а также среднее время задержки ТС (СЗ) на таких маршрутах. Адаптивная коррекция продолжительности фаз состоит в перераспределении от фаз с меньшим значением контролируемого показателя к фазам с большим его значением.

Выявление наиболее эффективных методов регулирования при определенном типе дорожной обстановки с помощью натуральных экспериментов нереально. Разработана методология компьютерных экспериментов для этой цели по типу [3, 4]. В ее основе лежат представление временного интервала между последовательными ТС в однородном кластере случайной величиной и выявление порождаемой регулированием структуры входных потоков. Первые результаты применения этой методологии на примере Т-образного перекрестка показывают, что адаптивное регулирование приводит к выравниванию длин очередей и уменьшению максимальной задержки по направлениям по сравнению с фиксированным, особенно при использовании показателя МО.

[1]. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: Росавтодор, 2013. 69 с.

[2]. Живоглазов В.Г. Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. 1082 с.

[3]. Solov'yev A.A., Valuev A.M. Organization of Traffic Flows Simulation Aimed at Establishment of Integral Characteristics of Their Dynamics // Advances in Systems Science and Applications, 2018. Vol. 18, N. 2, p. 1-10.

[4]. Solov'yev A.A., Valuev A.M. Combined Intelligent Control of a Signalized Intersection of Multilane Urban Highways. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020. Vol 1126, p. 471-480.

# Исследование эффективности работы пульсирующих взрывных устройств в зависимости от прочности конструкционных материалов корпусов твердотопливных зарядов

Кельнер М.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
mskelner@yandex.ru

Приводится анализ результатов натурных экспериментальных исследований по изучению влияния прочности конструкционных материалов тонкостенных корпусов сосредоточенных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) на эффективность работы пульсирующих взрывных устройств (ПВУ) различного целевого назначения.

В работе [1] было показано, что по термодинамическим показателям режим детонационного горения топливной смеси более выгоден, чем режим дефлаграционного горения. В современных условиях, когда энергетические возможности химических топлив практически достигли своего предела, разработчики все чаще ищут новые подходы и пути повышения КПД и мощности энергосиловых установок [2].

Проведенные ранее авторами теоретические и экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения взрывореактивных установок (ВУ) для бурения горных пород и твердотопливных детонационных ракетных двигателей (ТДРД) при оснащении их надежной системой подачи зарядов ВВ в рабочую зону с частотой до 1000 Гц и специальными высокобезопасными средствами их инициирования [3-5].

Использование многоцветных отражателей требует наличия высокочастотных механических систем для раздельной подачи зарядов ВВ в рабочую зону, что накладывает условия на прочностные свойства корпусов для защиты зарядов ВВ от повреждений.

Следует отметить, что несущая способность тонкостенных корпусов для зарядов ВВ зависит не только от геометрических характеристик самих корпусов (диаметра, их высоты и толщины), мощности заряда, но и от прочностных свойств конструкционных материалов, используемых для изготовления этих корпусов.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования влияния величин временного сопротивления на растяжение  $\sigma_v$  конструкционных материалов корпусов твердотопливных зарядов ПВУ различного целевого назначения, изготовленных из различных марок сталей, а также бронзы марки БрОЦ4-3.

Используемый нами малый оболочечный заряд разработан на основе концепции специального электродетонатора (СЭД), предполагающий переходные режимы формирования пересжатой детонации [5]. Корпуса СЭД изготавливались из указанных конструкционных материалов.

Нас интересовали процессы развития детонации малых зарядов ВВ в тонкостенных металлических корпусах толщиной до 3 мм с каналами переменного сечения диаметром от 1 до 6 мм, инициируемых электропроводным пленочным мостиком.

Образовавшаяся после детонации полость конусообразной формы свидетельствует о том, что процесс развивался в режиме пересжатой детонации. На поверхности канала четко видны кольцеобразные, характерные для детонации, следы. Об очень высокой температуре процесса свидетельствуют застывшие капли расплавленного металла. При различной плотности ТЭН температура в детонационной волне для установившегося режима детонации лежит в диапазоне 3400–4400 К.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что после подрыва СЭД на контактной поверхности свинцовых цилиндров, продукты взрыва образуют полости, имеющие форму шарового или эллиптического сегмента. Было установлено, что на форму образуемой полости прямое влияние оказывает временное сопротивление материала, из которого изготовлен корпус СЭД.

Установлено, что при увеличении временного сопротивления материала корпуса заряда ВВ в 4 раза КПД разрушения нагружаемого образца (бризантность по свинцу) от сосредоточенного заряда возрастает в 1,5 раза, что свидетельствует о важности выбора материала корпусов для разрабатываемых зарядов ПВУ различного целевого назначения.

Результаты, полученные в ходе исследований, позволяют рекомендовать использовать конструкционные материалы при проектировании корпусов зарядов с временным сопротивлением:

–  $\sigma_v < 520$  МПа для изделий фугасного действия, оснащенных многоцветными отражателями, например для ТДРД;

–  $\sigma_v > 520$  МПа для изделий бризантного действия, оснащенных одноцветными отражателями и кассетами, например для ВУ.

[1]. Зельдович Я.Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ. 1940. Т. 10. № 17. С. 1453-1461.

[2]. Соловьев В.О. Факторы, влияющие на КПД многоимпульсных взрывных устройств с отражателями // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2002. №3. С. 50-55.

[3]. Степанов Ю.С., Соловьев В.О. Влияние основных параметров взрывореактивной установки на размеры образуемой полости в мягких горных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 2. С. 61-65.

[4]. Фролов К.В., Соловьев В.О., Пацок В.В. Об использовании взрывореактивных комплексов малого класса для разрушения горных пород и искусственных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. № 5. С. 3-7.

[5]. Соловьев В.О., Думенко В.И., Электродетонатор и электровоспламенитель для него // МКИ: 6 F 42 В 3/13, Патент №2056034, РФ, приоритет от 30.03.1992г. Оpubл. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» №7 от 10.03.1996г., ФИПС РОСПАТЕНТ.



## Исследования на динамические нагрузки детонаторов нового поколения

Кельнер М.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благодного РАН, Москва, Россия  
mskelner@yandex.ru

В России и за рубежом ведутся научные исследования по созданию новых средств для разработки горных пород различной категории крепости, а также для оснащения устройств, осуществляющих работу взрывным способом, которые нуждаются, прежде всего, в новых средствах инициирования [1, 2].

При плотном групповом взрывании серьезную проблему для средств инициирования (СИ) прежде всего, представляют ударные нагрузки [1, 3]. Применяемые штатные СИ ограничивают минимально допустимые расстояния между зарядами и численность одновременно используемых инженерных боеприпасов, являясь повышенным источником отказов [4]. Низкая эксплуатационная стойкость промышленных детонаторов и штатных СИ при проведении буровзрывных работ усложняет технологический цикл и стоимость работ. Детонаторы нового поколения должны обеспечить не только безопасность, но и работоспособность после ударного воздействия по их корпусу с энергией до 75 Дж.

Кроме того, при замене линейного инициирования скважинных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) точечным инициированием и повышении точности (разброса) инициирования зарядов, обеспечит более эффективное разрушение горных пород и уменьшит выход негабарита.

Проведенный анализ показал, что ни один из выпускаемых отечественной промышленностью детонаторов в полной мере не удовлетворяет поставленным требованиям.

Для разрабатываемых высокоточных и высокобезопасных специальных электрических детонаторов (СЭД), создаваемых на базе концепции для детонаторов нового поколения [5, 6], были проведены экспериментальные исследования на ударные нагрузки.

Исследование СЭД на воздействие ударных нагрузок проводилось с помощью маятникового копра МК-30А с наибольшим запасом потенциальной энергии 240 Дж [7], предназначенного для испытания образцов металлов и сплавов на двух опорный ударный изгиб по ГОСТ 9454-78 (метод Шарпи), близким по характеру к удару ковша экскаватора при расчистке завалов.

Исследования были направлены на установление возможностей работы СЭД после воздействия на них ударной энергии не менее 75 Дж. При проведении исследований использовались СЭД, основной корпус которых изготавливался из закаленной стали 30ХГСА. Плотность заряжения детонатора ТЭН составляла 1,4 г/см<sup>3</sup>, а первоначальная масса 0,34 г. Энергия удара копра по СЭД варьировалась в диапазоне от 30 до 96 Дж.

Проведенные экспериментальные исследования позволили:

1. Получить эмпирические безразмерные величины деформации основных корпусов СЭД от энергии удара маятника в диапазоне от 30 до 96 Дж, изготовленных из стали 30ХГСА, и подтвердить работоспособность СЭД с учетом, что энергия удара превышала в 1,92 раза от допустимой для АТЭД-15 (промышленный детонатор, выдерживающий наибольшие нагрузки) и в 1,28 раз для предъявляемых к изделиям нового поколения.
2. Утверждать, что при энергии удара 75 Дж могут использоваться более дешевые стали, типа Ст 20, Ст 45, имеющие меньший предел прочности на растяжение [8].
3. Экспериментально подтвердить разработанную концепцию, на базе которой создаются СЭД, обладающие более высокой устойчивостью к ударным нагрузкам, чем штатные детонаторы, используемые в настоящее время в промышленности.

Требуется провести дополнительные исследования на ударные нагрузки СЭД, корпуса которых будут выполнены из разных конструкционных материалов, т.к. порог отказов работы детонаторов не был установлен.

[1]. Граевский М.М. Справочник по электрическому взрыванию зарядов ВВ. М.: Рандеву-АМ, 2000. 448 с.

[2]. Singh J.K., Mandal S.K., Banerjee G. An Empirical Modeling and Evaluation Approach for the Safe use of Industrial Electric Detonators in the Hazards of Radio Frequency Radiation // Journal of Scientific and Industrial Research. 2021. Vol. 80. Iss. 1. P. 27.

[3]. Единые правила безопасности при взрывных работах: Утверждено Госгортехнадзором России 24.03.92. М.: НПО ОБП, 1992. 239 с.

[4]. Соловьев В.О., Франкевич А.А., Оценка эффективности инженерных боеприпасов при пробитии протоки на реке Буря и предложения по их совершенствованию // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 31-40.

[5]. Думенко В.И., Соловьев В.О. Электродетонатор и электровоспламенитель для него. РФ Патент 2056034 С1, 1996.

[6]. Соловьев В.О. Капсюль-детонатор. РФ Патент 2070708 С1, 1996.

[7]. ГОСТ 10708–82. Копры маятниковые. Технические условия. М.: ИПК «Издательство стандартов», 1995. 7 с.

[8]. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

## Исследование электрического взрыва мостиков специальных детонаторов из легкоплавких оловянных составов

<sup>1,2</sup>Лавров В.В., <sup>2</sup>Шилкин Н.С.

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

lavrficp@yandex.ru

<sup>2</sup>ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия.

Детонаторы по начальному источнику энергии для генерации начального импульса классифицируют на электрические, неэлектрические и комбинированные. Электродетонаторы в настоящее время имеют самое широкое распространение.

В электрических средствах взрывания начальный импульс создается с использованием электрической энергии, передаваемой от внешнего источника к инициирующему устройству по электровзрывной цепи. Электрический способ применяется, прежде всего, в силу высокой надежности, безопасности и простоты использования. Он обеспечивает дистанционное инициирование как одиночных, так и групповых зарядов в заданные моменты времени, и позволяет проводить проверку всей электросети перед подрывом. Изучение путей совершенствования электродетонаторов, предназначенных для промышленного применения, постоянно происходит с появлением новых технологий и материалов. Основной целью является повышение безопасности и отказ от использования наиболее опасных и экологически вредных веществ, к которым относятся большинство инициирующих взрывчатых веществ (ВВ). Эта идея, в частности, была осуществлена в работах [1-3].

В работах [3, 4] была представлена новая конструкция детонатора со взрывающимся мостиком в канале переменного сечения, обеспечивающим быстрый переход к детонации вторичного ВВ без использования инициирующего. Расчетно-теоретическое обоснование размеров канала и толщины стенок гильзы проведено в работах [5, 6]. Также в [4] было предложено использовать в качестве токопроводящего материала мостика легкоплавкие композиции с температурой плавления не выше температуры воспламенения взрывчатых веществ, что, по мнению авторов, должно повысить безопасность разрабатываемых детонаторов.

Целью данной работы является экспериментальное исследование электрического взрыва мостиков из оловянного состава с низкой температурой плавления, которые могут создавать электрический импульс с мощностью необходимой для подрыва вторичного ВВ при использовании стандартных взрывных машинок, используемых при добыче полезных ископаемых взрывным способом. Электрический разряд создавался при помощи стандартного конденсаторного взрывного прибора ПИВ-100М. Из анализа осциллограмм электрического тока и падения напряжения на мостике получены временные зависимости сопротивления мостика, мощность джоулевых потерь в нем. В модельном приближении получена масса взрывающейся части мостика и удельный энергетический коэффициент сопротивления материала мостика до начала плавления. Данный подход может быть применен для нахождения оптимальных размеров мостика, определения его теплофизических параметров при электрическом взрыве, а также для исследования электрофизических свойств других легкоплавких материалов, перспективных для использования в новых промышленных детонаторах, в основе конструкции которых лежат идеи авторов работы [3].

[1]. Johnson L.H. Electric initiator with exploding bridge wire // US patent 3040660 (filled Nov 8, 1944, applied June 26, 1962).

[2]. Stroud J.R. and Ornellas D.L. Flying plate detonator using a high-density high explosive // US patent 4788913, 1971.

[3]. Думенко В.М., Соловьев В.О. Электродетонатор и электровоспламенитель для него // МКИ: 6F42 В 3/13, Патент № 2056034, РФ, приоритет от 30.03.1992 г.

[4]. Соловьев В.О., Овчинников Н.М., Пацюк В.В., Лавров В.В. Специальные детонаторы нового поколения. // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – №1. – С.88-99.

[5]. Орлов Ю.Н., Соловьев В.О., Суслин В.М. Оптимизация режима детонации в каналах переменного сечения // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – №4. – С. 69-74.

[6]. Орлов Ю.Н., Соловьев В.О., Суслин В.М. Расчет поведения ударной волны в каналах детонатора // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – №4. – С.112-117.

## Численное исследование шнекового транспортера в твердотопливном ПВУ для бурения горных пород

Макаров С.Б.

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

sb-makarov@yandex.ru

Установлено, что при бурении скважин взрывами частотный режим инициирования зарядов взрывчатых веществ (ВВ) влияет на эффективность разрушения пород (рациональным является диапазон 100–500 Гц), а также на высоту выброса разрушенной породы с забоя на поверхность по формуле:

$$H_b = a \times v, \quad (1)$$

где  $H_b$  – высота выброса шлама, м;  $a = 0.03–0.06$  – коэффициент, зависящий от диаметра образуемой скважины и энергии единичного заряда ВВ, м/гц;  $v$  – частота последовательного инициирования зарядов ВВ, Гц.

Для разрабатываемого пульсирующего взрывного устройства (ПВУ) основным элементом системы подачи сосредоточенных цилиндрических зарядов ВВ в рабочую зону был выбран шнек.

Основная задача исследования – достичь рабочих частот вращения шнекового вала, соответствующих рациональному частотному диапазону инициирования зарядов ВВ, но в дорезонансном режиме работы вала.

Шнековый вал представляет собой стальной вал общей длиной 0.85 м с диаметром центральной части 20 мм. Шнек является трехзаходным, выполнен в виде винтовой оболочки толщиной 2 мм, имеет длину 0.60 м и наружный диаметр 70 мм, продольный шаг составляет 96 мм.

Учитывая сложную геометрию шнекового вала, исследования выполнены методом конечных элементов в сочетании с технической теорией изгибных колебаний стержня постоянного сечения [1], согласно которой значение собственной частоты определяется выражением:

$$f_k = \frac{p_k}{2\pi} = \left( \frac{(al)_k}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}}, \quad (2)$$

где  $f_k$  –  $k$ -я собственная частота стержня, Гц;  $p_k$  –  $k$ -я собственная частота стержня,  $c^{-1}$ ;  $(al)_k$  –  $k$ -й безразмерный корень частотного уравнения стержня;  $l$  – длина стержня, м;  $E$  – модуль Юнга материала стержня, Па;  $J$  – осевой момент инерции поперечного сечения стержня,  $m^4$ ;  $\rho$  – плотность материала стержня,  $kg/m^3$ ;  $F$  – площадь поперечного сечения стержня,  $m^2$ . Величина безразмерных корней частотного уравнения  $(al)_k$  в (2) определяется из уравнения частот, составленного для конкретного типа закрепления рассматриваемого стержня.

Из-за сложной геометрической формы шнекового вала необходимо было оценить допустимость применения для его анализа технической теории изгибных колебаний стержней постоянного сечения.

Сравнение величин собственных частот свободного (незакрепленного) шнекового вала и этого же вала без винтовой шнековой оболочки показало, что шнековая оболочка является дополнительной распределенной массой, внося незначительный (менее 5%) вклад в его изгибную жесткость и поэтому применение (2) для расчетов на стадии проектирования вполне обосновано.

В итоге численных экспериментов (см. табл. 1) удалось повысить низшую собственную частоту изгибных колебаний шнекового вала с 56.141 Гц до 127.25 Гц (на 127%).

Таблица 1. Результаты вариантных расчетов шнекового вала

5	1-я частота, $f_{шн}$ , Гц	Масса вала $M_{шн}$ , кг	Описание варианта
1	56.141	3.2449	Исходный вариант шнекового вала, масса включает массу кронштейнов
2	117.54	2.7027	Незакрепленный шнековый вал с центральной частью сплошного сечения диаметром 20 мм
3	134.47	1.7464	Незакрепленный шнековый вал с центральной частью в виде трубы с наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 3 мм
4	103.09	3.9339	Шнековый вал с центральной частью сплошного сечения диаметром 20 мм, с усиленными кронштейнами
5	123.64	3.9339	Шнековый вал с центральной частью сплошного сечения диаметром 20 мм, с усиленными кронштейнами и левой опорой, смещенной вправо
6	127.25	2.9776	Шнековый вал с центральной частью в виде трубы с наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 3 мм, с усиленными кронштейнами и левой опорой, смещенной вправо

Таким образом, при допущении работы трехзаходного шнекового вала на частоте 100 Гц высота выброса породы согласно (1) составит 9–18 м при частоте инициирования зарядов ВВ 300 Гц, что лежит в области эффективной частоты разрушения горных пород.

1. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. / Под общей ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. М: Изд-во Машиностроение, 1968. Т.3. 567 с.

## Вибрационная биомеханика опорных взаимодействий в спортивных снарядах

Минаев А.Я.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
minaev0804@ya.ru

Изделия производимые мировой спортивной индустрией постоянно совершенствуются благодаря применению передовых, инновационных технологий. Одной из целей, которая стоит перед создателями комфортных высокоскоростных спортивных снарядов, подвергающихся воздействию значительных динамических нагрузок, является обеспечение минимальных вибраций, возникающих в спортивных изделиях, передающихся на тело спортсмена. Исследования в этой области предусматривают поиск возможных вариантов устранения нежелательных воздействий вибраций негативно сказывающихся на управлении снарядом. Большой ряд спортивных снарядов можно рассматривать как балочные системы с распределёнными параметрами. Для предварительной оценки возникновения вибрационных воздействий в рассматриваемых системах можно использовать специально разработанные для этих целей ударные, вибрационные лабораторные испытательные стенды. Одним из примеров экстремальных, ударно-вибрационных нагрузок передающихся на спортсмена является горнолыжный спорт [1]. На некоторых режимах прохождения трассы, при скорости спуска более 100 км/час, в зависимости от различных условий, возбуждаются настолько сильные колебания в лыжах, что это приводит к потере необходимого взаимодействия, контакта лыжи с опорной поверхностью трассы. Лыжи становятся неуправляемыми. Ступни спортсмена могут попадать в пучность формы колебаний лыжи, которую можно рассматривать как балочную систему подверженную высокочастотным колебаниям с большими амплитудами.



Рис. 1. Фрагмент стенда

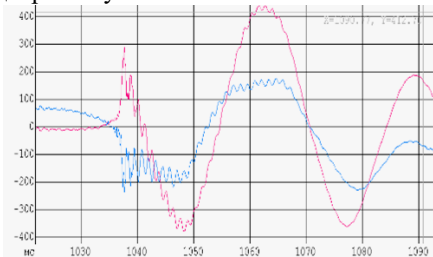


Рис. 2. Крутильно-изгибные колебания, модель 1

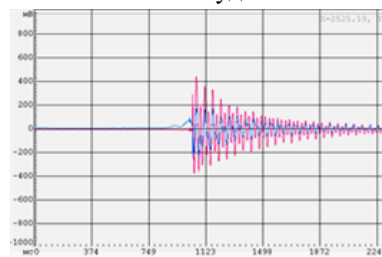


Рис. 3. Затухающие колебания, модель 1

1

Возможным вариантом испытаний представленного снаряда-лыжи может служить метод динамического нагружения для исследования собственных частот, форм и декремента затухания колебаний, когда в качестве начальных условий задаются перемещения тестируемого объекта на стенде с помощью ударников, показанных на рис. 1. С помощью данного стенда можно воспроизводить как изгибные, так и совместные крутильно-изгибные колебания, на примере, закреплённой здесь лыжи, как балочной модели. Запись осциллограмм колебаний проводилась для двух моделей лыж, имеющих различную крутильно-изгибную жёсткость. Примеры записи осциллограмм крутильно-изгибных колебаний, возникающих в модели 1 приведены на рис. 2. На рис. 3 приведён пример записи осциллограмм полного процесса затухающих в лыже крутильных колебаний, переходящих в изгибные колебания. Время действия затухающих крутильно-изгибных колебаний  $t = 1586$  мс. На основной тон изгибных колебаний с частотой 62.5 Гц и крутильных колебаний с частотой 34.5 Гц накладывается высокочастотный тон быстро затухающих с небольшими амплитудами крутильных колебаний 807 Гц и изгибных колебаний 1800 Гц. Сравнительный анализ основного тона изгибно-крутильных колебаний двух моделей показал следующее. Амплитуды ускорений крутильных колебаний модели 2 по сравнению с моделью 1 выше. Время продолжительности крутильных колебаний модели 2 больше чем модели 1. Таким образом, крутильная жёсткость модели 1 имеет отличия от модели 2. Амплитуды ускорений изгибных колебаний модели 2 по сравнению с моделью 1 выше. Время продолжительности первого периода изгибных колебаний для обеих моделей практически одинаковы и изгибная жёсткость модели 1 выше, чем модели 2.

Полученные измеренные опытные данные показывают, что крутильно-изгибные колебания лыжи (как балки с распределёнными параметрами) обладают высокой информативностью о характере возникающих колебаний и динамических признаках тестируемой модели [2]. С помощью сравнительного анализа полученных в результате испытаний динамических параметров, возможно, выбрать или указать модели с улучшенными скоростными характеристиками, с уменьшенными вибрациями и наилучшими комфортными свойствами.

[1]. Лубяко А.А., Русия А.Г., Соловьёва Е.М., Толстов Ю.С. Вибрационная нагрузка в скоростных видах зимнего спорта (скоростной спуск, ски-кросс, бобслей) // Медицина экстремальных ситуаций, 2015, №2 (52). С. 44-52.

[2]. Минаев А. Я. Экспериментальные исследования ударных взаимодействий и возникающих колебаний в упруго деформируемых биомеханических системах "спортсмен-инвентарь" // Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Москва: Московская государственная академия физической культуры, 2014. С. 64-71.

## О подходе к моделированию системы «ротор-статор» в режиме обкатки

Никифоров А.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
n.andre@mail.ru

Большой проблемой в инженерной практике, связанной с вибрацией вала или ротора, является разрушительное контактное влияние на систему статора [1]. При задевании ротора за статор развиваются значительные силы нормального давления и сухого/полусухого трения [2]. При этом сила трения ротора о статор препятствует обычной синхронной или также часто встречающейся прямой асинхронной прецессии, провоцируя обратное прецессионное движение (ротора и его оси). Это, в свою очередь, может представлять собой либо безотрывное чистое качение (ротора по статору), либо безотрывное качение с проскальзыванием, либо локально-обрывное (ударно-безотрывное) обкатывание. Второй режим наиболее опасен, т.к. сопровождается самым стремительным истиранием контактных поверхностей. С целью предсказания динамики системы «ротор-статор» при безотрывной обкатке с проскальзыванием, в частности для прогнозирования скорости обратной прецессии, разработана методология определения возникающих контактных сил, амплитуд и частот колебаний [3].

Нормальная  $N$  и тангенциальная  $\mu N$  составляющие контактной нагрузки, как комплексной  $N(1+i\mu)$ , где  $\mu$  - коэффициент трения скольжения, а также амплитудно-частотные характеристики находящейся в режиме обкатки исходной системы «ротор-статор» с зазором  $\delta$  (рис. 1, а) рассчитываются с помощью эквивалентной, имеющей дополнительную безазорную опору ( $\delta=0$ ) с противоположной нагрузкой  $N(1+i\mu)$  (рис. 1, б) и контактной жесткостью  $k_k$  (рис. 1, в).

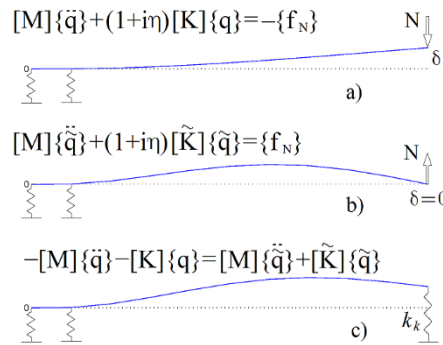


Рис. 1. Модели определения контактных сил и АЧХ системы с ротором, обкатывающим статор

В представленных теоретических моделях чем больше силы  $N(1+i\mu)$ , тем больше перемещения  $\{\tilde{q}\}$ -прогибы «опирания». При отсутствии контакта  $N=0$  и  $\{\tilde{q}\}=\{0\}$ . Предположение малости трения внутри ротора ( $\eta \rightarrow 0$ ) и вне его, существования круговой обратной прецессии  $\{q\} = e^{-i\Omega t} \{A\}$ ,  $\{\tilde{q}\} = e^{-i\Omega t} \{\tilde{A}\}$  и вращения контактной силы синхронно с прецессией  $N e^{-i\Omega t}$ , где  $\{A\} = \{A_s\} + \{\tilde{A}\}$  - полные амплитуды при контакте,  $\{A_s\}$  - амплитуды «касания», когда зазор между ротором и статором выбран, но давление (опирание) ротора на статора отсутствует ( $N=0$ ),  $\{\tilde{A}\}$  - амплитуды «опирания», приводит к:

$$\{\tilde{A}\} = \left( [\tilde{K}] - \Omega^2 [M] + [K] - \Omega^2 [M] \right)^{-1} \left( \Omega^2 [M] - [K] \right) \{A_s\},$$

$$\{f_N\} = \left( [\tilde{K}] - \Omega^2 [M] \right) \left( [\tilde{K}] - \Omega^2 [M] + [K] - \Omega^2 [M] \right)^{-1} \left( \Omega^2 [M] - [K] \right) \{A_s\}.$$

Помимо искоемых контактных сил и перемещений может быть найдена и скорость  $\Omega$  обратной прецессии из определителя вида:

$$\left| (2[M])^{-1} ([\tilde{K}] + [K]) - \Omega^2 E \right| = 0.$$

Таким образом, две условные линейные подсистемы, одна из которых исходная бесконтактная (с бесконечным зазором в месте контакта), а другая – эквивалентная с нулевым зазором в контактном месте и с повышенной за счет дополнительной опоры поперечной жесткостью  $[\tilde{K}]$ , позволяют вычислить ключевые неизвестные параметры исходной нелинейной (контактной) системы «ротор-статор».

[1]. Шатохин В.Ф. Погашающая способность демпферных устройств при обкатке ротором статора. Теплоэнергетика, 2019, №2, с.32-40.

[2]. Briand Y., et al. Dry-whip phenomenon in on-board rotordynamics: Modeling and experimentation. Journal of Sound and Vibration. Vol.513 (2021), paper no.116398.

[3]. Никифоров А.Н. Прикладная полуэмпирическая теория безотрывного движения ротора по статору. Санкт-Петербург: СУПЕР Издательство, 2021. 280 с.

## Фрактало-подобные структуры в биомеханике и системе генетического кодирования

*Петухов С.В., Свириг В.И.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
spetoukhov@gmail.com

Целью работы является изучение – в интересах техники, биотехнологий и медицины - информационных патентов живой природы путем выявления скрытых закономерностей в информационных последовательностях генетических молекул ДНК из общедоступного банка генетических данных GenBank.

Все наследуемые биомеханические структуры по необходимости связаны с системой молекулярно-генетического кодирования, опирающейся на генетические молекулы ДНК и РНК и передающей потомкам информацию об этих структурах в закодированном виде. В ИМАШ РАН структурные взаимосвязи между молекулярной системой кодирования генетической информации и наследуемыми биомеханическими объектами изучаются на систематической основе в рамках генетической биомеханики. Исследования этого направления важны в силу интенсивного развития в мире генетической инженерии и персональной генетики, производства новых материалов и функциональных систем технического назначения на базе ДНК и других биологических компонент. Особо актуальными являются разработки искусственного интеллекта, в которых инженеры стремятся воспроизвести наследуемые свойства биологического интеллекта.

Как сказал В.В. Путин, «тот, кто станет лидером в сфере искусственного интеллекта, будет властелином мира» (ТАСС, <https://tass.ru/obschestvo/4524746>).

Основоположники квантовой механики П. Йордан и Э. Шредингер указывали на ключевое отличие живых тел от неодушевленных: неодушевленные объекты управляются средним случайным движением их миллионов частиц и движение отдельных частиц не существенно для целого; напротив, в живом организме избранные – генетические - молекулы обладают диктаторским влиянием на весь организм за счет квантового усиления. При этом Йордан утверждал, что упущенные наукой законы жизни являются законами вероятностей квантовой механики [1]. Для раскрытия секретов и патентов живой природы изучение закономерностей информатики ДНК является необходимостью.

В результате исследования нами обнаружены некоторые универсальные закономерности в разреженных эпипеях информационных последовательностей одноклеточных ДНК и представительного множества геномов высших и низших организмов. Эти закономерности сопряжены с дихотомической фрактало-подобной статистической организацией данных последовательностей, представляемых в бинарной форме на основе следующих трех видов бинарно-оппозиционных субалфавитов алфавита четырех нуклеотидов ДНК (аденина А, тимина Т, цитозина С и гуанина G): 1) пуринов и пиримидинов; 2) кето- и аминок-молекул; 3) сильных и слабых водородных связей [2, 3].

Фрактало-подобные структуры в генетически наследуемых телах хорошо известны. Примером является бронхиальное дерево легких, имеющее 23 уровня дихотомических ветвлений. С фракталами связаны онкологические структуры, упаковка хромосом, устройство мозга, биологические суперспирали и пр. [4, 5].

В отличие от дихотомий и фракталов телесных конструкций в бинарных последовательностях геномных ДНК мы встречаемся с принципиально иным типом дихотомий: дихотомиями статистических (вероятностных) характеристик в информационных последовательностях ДНК. Обширные дихотомические фрактальные сети вероятностей геномных ДНК – это та почва, из которой произрастают живые тела и генетический интеллект. Вещественные структуры живых тел возникают не на пустом месте, а имеют структурные прототипы в закономерной системе геномных информационных вероятностей в многообразии генетических языков с их семействами многопараметрических алфавитов.

На основании этих и других полученных нами результатов мы полагаем, что будущее генетической биомеханики и информатики, а также их приложений, в том числе в искусственном интеллекте, связано с изучением глубинной и закономерной системы вероятностей в мире стохастических энергий взаимодействия в живой материи. Наши результаты переключаются с работами В.В. Налимова, который полагал формализмы теории вероятности ключом к пониманию сознания и считал целью своей жизни построение вероятностной модели языка, а затем и сознания в целом [6].

[1]. McFadden J., Al-Khalili J. The origins of quantum biology. // Proc. R. Soc. A 474 (2220), 1–13 (12 December 2018). <https://doi.org/10.1098/rspa.2018.0674>.

[2]. Петухов С.В. Матричная генетика, алгебры генетического кода, помехоустойчивость. - М, ПХД (2008). <http://petoukhov.com/matrix-genetics-petoukhov-2008.pdf>.

[3]. Petoukhov S.V., He M. Algebraic biology, matrix genetics, and genetic intelligence. – Singapore, World Scientific (2023), 616 pages.

[4]. Tsang W.H. Fractal brain theory // Lulu.com (2016), 530 p. ISBN 978-1-326-75322-1.

[5]. Петухов С.В., Свириг В.И., Хазина Л.В. Бионика спиральных структур // Проблемы машиностроения и надёжности машин, (2015), №3, с.70-76.

[6]. Налимов В.В. Разбрасываю мысли. В пути и на перепутье // М., Центр гуманитарных инициатив, 2015, ISBN978-5-98712-521-2.

## Полиполярная аппроксимационная система координат

Ракчеева Т.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
rta\_ra@list.ru

Успешность решения той или иной задачи зависит от выбора подходящей системы координат, представляющей пространство предметной области, в котором можно было бы описать конкретную задачу так, чтобы она имела наиболее простое описание в этой системе координат. Наряду с повсеместно используемой декартовой прямоугольной системой, разработано много других – криволинейных систем координат, наиболее простая из которых классическая полярная система координат. Разработана полиполярная система координат, формируемая семейством изофокусных лемнискат [1], которая как и классическая полярная, характеризует точку плоскости полярными координатами: метрической  $\rho$  и угловой  $\varphi$ , но имеет не один центр-полус, а несколько – конечное число  $k$  полюсов:  $f_1, f_2, \dots, f_k$ . Полный набор фокусов семейства лемнискат образует ее структурное начало. Классическая полярная система координат оказывается при этом частным случаем полиполярной, когда фокусная система состоит из одного фокуса.

Метрическая полиполярная компонента  $\rho$  расстояния от произвольной точки до структурного начала определяется как среднегеометрическое фокусных полярных радиусов  $\rho_j \equiv r_j$  до каждого из фокусов  $kf$ -системы. Нулевое значение  $\rho$  принимает только в  $k$  полярных точках  $kf$ -системного начала координат. Метрическая координата  $\rho$  существует для любой точки; факторизация плоскости координатному параметру  $\rho$  взаимно однозначна [2];  $kf$ -лемниската  $\rho = \text{const} \equiv R^k$ , удовлетворяя условию постоянства расстояния до  $kf$ -системы, может рассматриваться на плоскости как многофокусный аналог полярной окружности – полиполярная окружность с центром в  $kf$ -системном начале.

Угловая полиполярная координата определяется как среднее арифметическое фокусных полярных углов  $\varphi_j$  каждый из которых определяется как классический полярный угол относительно  $j$ -го полюса-фокуса. Угловая координата  $\varphi$  для произвольной точки определяет ее направление на  $kf$ -структуру. Угловая координата  $\varphi$  обладает периодической замкнутостью с обычным диапазоном значений от 0 до  $2\pi$ .

Семейство изопараметрических кривых угловой координаты  $\varphi = \text{const}$  есть семейство градиентных кривых к семейству лемнискат  $\rho = \text{const}$ ; сопряженные семейства изопараметрических кривых  $\rho = \text{const}$  и  $\varphi = \text{const}$  являются взаимно ортогональными. Замкнутый и однократный обход многосвязных лемнискат с непрерывной и монотонной  $\varphi$ -параметризацией в диапазоне  $[0, 2\pi]$  существует и однозначен. [3].

В пределе  $kf$ -структура переходит в единый центр-фокус, семейство  $kf$ -лемнискат – в семейство окружностей с этим центром, а семейство градиентных кривых – в семейство градиентных к окружностям радиальных прямых, проходящих через фокусный центр.

Полиполярная  $kf$ -система координат представляется хорошо организованной в большом списке имеющихся криволинейных систем [4]. Особенностью предложенной в данной работе системы координат является ее широкий диапазон от универсальности до узкой специализации. Эта особенность обеспечивается аппроксимационными возможностями семейства многофокусных лемнискат (рис. 1, а). Фокусное представление формы кривой позволяет настроить полиполярную систему координат таким образом, чтобы метрическая компонента соответствовала форме заданной кривой (рис. 1, б). Настройку на прикладную задачу можно осуществить в мануально-визуальном режиме. В результате с предметным образом можно связать собственную (индивидуальную) систему координат – метрическая компонента может быть произвольной, достаточно сложной, настраиваемой вручную или автоматически, и при любой форме метрической компоненты угловая компонента получается ортогональной.

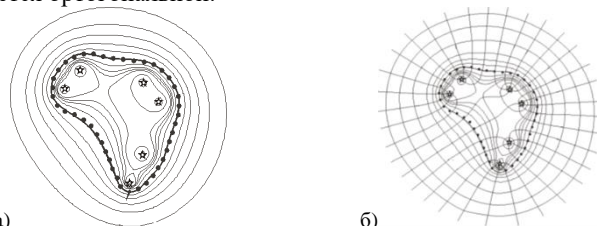


Рис. 1. а) Приближение кривой  $6f$ -лемнискатой с изофокусным семейством, б)  $6f$ -полиполярная собственная система координат

Метрическая структура полиполярной аппроксимационной системы координат такова, что в ней возможны разные локальные метрики, связанные с отдельными фокусами.

Лемниската и ее фокусная структура имеют одну и ту же группу симметрий – фокусное представление полиполярной окружности позволяет менять ее симметрии и формы мотива, управляя фокусами, а интерактивное управление фокусами дает возможность непрерывной трансформации орнамента.

[1]. Hilbert D. Gessamelte Abhandlungen. - Berlin: Springer, 1935. Bd. 3. - P. 435.

[2]. Ракчеева Т.А. Полиполярная лемнискатическая система координат. Компьютерные исследования и моделирование, 2009. Т. 1. №3. С. 251-261.

[3]. Ракчеева Т.А. Фокусная аппроксимация на комплексной плоскости. ЖВММФ. 2011. Т. 51. №11. С. 1847-1855.

[4]. Rakcheeva T.A. Polypolar Coordination by the Multifocal Lemniscates. Advances in Artificial Systems for Power Engineering, 2021. Vol 1403, Pages 50-62. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-67133-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-67133-4_3).

## Особенности использования технологии лазерного ударного упрочнения при наличии в материале предварительных напряжений

*Сахвадзе Г.Ж.*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
sakhvadze@mail.ru

Целью работы исследования является создание эффективного инструмента для регулирования остаточных напряжений, возникающих при использовании технологии лазерного ударного упрочнения (ЛУУ), путем создания в материале предварительных напряжений (ПН). Для этого разработана конечноэлементная модель, где во время лазерного ударного упрочнения в материале создается упругое ПН.

Как известно, технология ЛУУ позволяет создавать большие по амплитуде и глубокие по проникновению поля сжимающих остаточных напряжений (СОН) в сочетании с относительно высоким качеством обрабатываемой поверхности [1]. Но остается проблема регулирования остаточных напряжений, чтобы минимизировать растягивающие остаточные напряжения, которые негативно сказываются на прочностные характеристики изделия.

Новым подходом к регулированию остаточных напряжений является введение предварительных напряжений (ПН) в материале во время ЛУУ. В работе [2] исследовано влияние ПН на общую деформацию образца при лазерной формовке. Показано, что растягивающие предварительные напряжения приводят к более высокой пластической деформации и более высоким итоговым СОН. Следовательно, использование эффекта наличия предварительного напряжения в материале является многообещающим инструментом при ЛУУ, в частности, в задачах адаптации получаемых остаточных напряжений к конкретному случаю. Для этого необходимо установление количественной взаимосвязи между предварительными напряжениями и итоговыми остаточными напряжениями. В настоящей работе исследуется алюминиевый сплав D16. Разработана специальная конечноэлементная модель в пакете ANSYS на основе методологии, изложенной в работах [3-4].

Полученные результаты показывают, что наличие предварительных напряжений в материале во время ЛУУ оказывает сильное влияние на итоговые остаточные напряжения. Показано, что можно устанавливать взаимосвязи между приложенными предварительными напряжениями и итоговыми остаточными напряжениями. С практической точки зрения очень интересно, что эффект от создания предварительных напряжений может быть удачно использован для модификации итогового профиля остаточных напряжений для каждого материала индивидуальным образом. Установлено, что такая модификация итоговых остаточных напряжений особенно перспективна для областей, где соотношение между приложенными предварительными напряжениями и итоговыми остаточными напряжениями является почти линейным. Однако следует иметь в виду тот факт, что после того, как итоговые остаточные напряжения достигают предела текучести, эффективность применения предварительных напряжений резко снижается.

В работе установлено, что если СОН находятся в диапазоне [-20 %, -100 %] от предела текучести, наблюдается почти линейная корреляция между предварительными напряжениями и остаточными напряжениями, что дает уникальную возможность для индивидуальной настройки нужных остаточных напряжений. Также установлено, что предварительные напряжения могут быть использованы для уменьшения требуемой плотности мощности лазерного излучения для создания желаемых остаточных напряжений в материале.

Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными из [2]. Наблюдается удовлетворительная сходимость между ними.

Таким образом, применение эффекта наличия предварительных напряжений в материале приводит к более экономичному использованию технологии ЛУУ, дополнительно способствуя повышению качества поверхности.

[1]. Keller S., Horstmann M., Kashaev N. at.al. Crack closure mechanisms in residual stress fields generated by laser shock peening. A combined experimental-numerical approach // Eng. Fract. Mech. 2019. Vol. 221. P. 106630.

[2]. Hu Y. Li, Z. Yu X. at.al. Effect of elastic prestress on the laser peen forming of aluminum alloy 2024-T351. Experiments and eigenstrain-based modeling // J. Mater. Process. Technol. 2015. Vol. 221. P. 214-224.

[3]. Sakhvadze G.Zh. Modeling of laser shock processing technology using an artificial neural network to determine the mechanical properties of Ti-6AL-4V titanium alloy // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2022. - Vol. 51. - № 8. - P. 831–839.

[4]. Sakhvadze G.Zh. Finite element Simulation of hybrid additive technology using laser shock processing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. - Vol. 52. - № 2. - P. 170-177.



## Применение технологии лазерной ударной формовки в машиностроении

Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
sakhvadze@mail.ru

Лазерная ударная формовка (ЛУФ) - это технология холодной обработки материалов и формования без использования штампов. С ростом высоконагруженности элементов машиностроительной, судостроительной и авиакосмической отраслей возрастает спрос на крупномасштабные тонкие пластики сложной формы [1]. Вероятно, со временем, технология ЛУФ постепенно может стать потенциальным перспективным методом формовки материалов. При ЛУФ под действием плазмы высокого давления тонкая пластинка подвергается высокоскоростной пластической деформации, в результате чего в поверхностном слое возникают сжимающие остаточное напряжение (СОН), а в поперечном сечении - изгибающий момент [2]. Под действием остаточных напряжений и изгибающего момента пластинка испытывает изгибную деформацию (выпуклую или вогнутую).

В работе устанавливается максимальная выпуклая изгибная кривизна пластинки, которую можно достичь с помощью технологии ЛУФ путем последовательного увеличения основных ее характеристик: коэффициента перекрытия лазерных пятен, количества повторяющихся лазерных импульсов и интенсивности плотности мощности лазерного излучения. Возникающий при ЛУФ изгибающий момент и изгибная кривизна рассчитываются по средним остаточным напряжениям, полученным методом конечных элементов (МКЭ). Предложенный способ прогнозирования кривизны пластинки может эффективно предсказывать изгибное поведение пластины, что позволяет правильно спланировать процесс формования при ЛУФ.

В данной работе анализируется динамика изгибной кривизны пластинки из алюминиевого сплава В95 толщиной 3 мм при варьировании коэффициента перекрытия лазерных пятен, количества повторяющихся лазерных ударов и интенсивности мощности лазерного излучения. Выявляются взаимосвязи между параметрами ЛУФ и изгибной кривизной пластинки. Расчетные значения кривизны сравниваются с известными экспериментальными результатами [3].

Исследуемый алюминиевый сплав В95 широко применяется в машиностроительных и аэрокосмических конструкциях благодаря своему легкому весу и высокой прочности. Для описания динамической реакции материала на воздействие лазерной ударной волны (в виде высокосортной пластической деформации) используется определяющее соотношение в виде модели Джонсона-Кука [4].

Исследован механизм изгиба пластинки под градиентом напряжений, объясняющий образование выпуклого изгиба пластинки при ЛУФ [5]. Показано, что кроме получения нужной кривизны пластинки при ЛУФ дополнительно получаем приповерхностные области со значительными полями СОН, что существенно повышает их физико-механические характеристики, в частности, усталостную прочность и коррозионную стойкость исследуемых материалов.

Установлено, что возникшие при ЛУФ сжимающие остаточные напряжения можно успешно использовать для вычисления индуцированного изгибающего момента и изгибной кривизны пластинки. Предложенный метод расчета также позволяет определить насыщенную изгибную кривизну тонкой пластинки, что обеспечивает оптимальный выбор параметров ЛУФ для достижения нужной изгибной кривизны пластинки.

Проведен сравнительный анализ остаточных напряжений по глубине при одиночном и многократном лазерных импульсных воздействиях, рассчитанных с помощью МКЭ, с экспериментальными данными. Показано, что результаты численного расчета хорошо соответствуют экспериментальным данным.

[1]. Zhou W.F., Ren X.D., Wang C.C. et al. Residual stress induced convex bending in laser peen formed aluminum alloy // J. Laser Appl. 2018. N 30. V. 1. P. 012001.

[2]. Peng Y.M., Chen J.P., Yang L. et al. Study on elongation after shot peen forming for integral panel of large aircraft // Aeronautical Manuf. Technol. 2017. N 9. P.97-100.

[3]. Hu Y.X., Han Y.F., Yao Z.Q. et al. Three-dimensional numerical simulation and experimental study of sheet metal bending by laser peen forming // J. Manuf. Sci. Eng. 2010. N. 132. V. 6. P. 061001.

[4]. Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г. Анализ механизмов изгиба пластин при использовании технологии лазерной ударной формовки // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. - №2. – С. 46-55. DOI: 10.52261/02346206\_2023\_2\_46

[5]. Сахвадзе Г.Ж. Конечноэлементное моделирование технологии лазерной ударной формовки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. - № 5. - С. 85-95. DOI: 10.31857/S0235711923050140

## Энергопоглощающее кресло с обратимой адаптацией

Саяпин С.Н.

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

S.Sayapin@rambler.ru

В современных авиационных и автотранспортных креслах используются функционально независимые друг от друга системы их адаптации к поверхности тела оператора и энергопоглощения и виброзащиты [1]. Целью этой работы является выявление энергопоглощающего материала с обратимой адаптацией и построение на его основе энергопоглощающего кресла с обратимой адаптацией (ЭКОА).

Для достижения поставленной цели в ИМАШ РАН была поставлена задача по выявлению легкого энергопоглощающего материала, способного принимать (адаптироваться) и фиксировать форму контактируемой поверхности тела и, после определенного на него воздействия, восстанавливать свою первоначальную форму. В результате проведенного информационного поиска и анализа отобранной литературы был выявлен уникальный пеноматериал, обладающий подобными обратимыми свойствами - выпускаемый отечественной промышленностью пористый пенополивинилформаль ТПВФ-ЗБФ [2], жесткость которого в сухом состоянии сопоставима с жесткостью конструкционного пенопласта, а в увлажненном – с жесткостью поролона. При этом в зависимости от степени увлажнения его жесткость изменяется от максимального значения до минимального и наоборот. На основании выявленного материала в ИМАШ РАН разработан новый подход к построению ЭКОА на основе применения пористого поливинилформяля марки ТПВФ-ЗБФ и автоматизированной системы увлажнения/сушки материала (рис. 1) [3, 4].

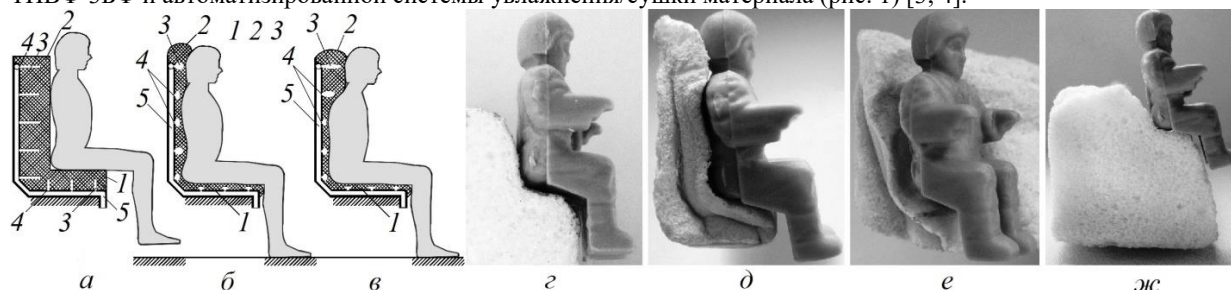


Рис. 1. Схема адаптации ЭКОА к контактирующей поверхности тела человека в начальном (а), строго вертикальном (б) и расслабленном (в) положениях тела (1 - сиденье, 2 - спинка, 3 - глухое отверстие, 4 - дренажное отверстие, 5 - разветвленный трубопровод), демонстрация обратимой адаптации на примере взаимодействия имитатора сиденья и спинки ЭКОА из пористого поливинилформяля марки ТПВФ-ЗБФ с манекеном летчика в уменьшенном масштабе (г—ж)

После усаживания пользователя в ЭКОА (рис. 1, а) путем увлажнения сиденья 1 и спинки 2 осуществляют их перевод из жесткого состояния в податливое. Подают увлажненный воздух в разветвленный трубопровод 5, который через дренажные отверстия 4 поступает в глухие отверстия 3 сиденья 1 и спинки 2 из пористого поливинилформяля марки ТПВФ-ЗБФ. После достижения требуемой степени податливости устройство увлажнения воздуха (на рис. 1 не показано) отключается. Далее включают устройство осушения воздуха и после отвердевания сиденья 1 и спинки 2, выключают. При этом контактируемая поверхность ЭКОА принимает форму тела пользователя (рис. 1, б). Аналогично форма сиденья 1 и спинки 2 может принимать форму тела в расслабленном положении (рис. 1, в). На рис. 1 г—ж показан пример реализации обратимой адаптации сиденья и спинки ЭКОА с использованием его имитатора в виде цельного куска пористого поливинилформяля марки ТПВФ-ЗБФ и манекена летчика: г — имитатор сиденья и спинки ЭКОА с манекеном летчика перед увлажнением; д — после увлажнения и сушки; е — адаптированный отпечаток манекена летчика после сушки; ж — восстановление первоначальной геометрии имитатора сиденья и спинки ЭКОА после его повторного увлажнения.

Предлагаемое ЭКОА позволит за счет управляемого регулирования жесткости сиденья и спинки повысить комфорт, надежность и безопасность в процессе эксплуатации. При этом конструкция ЭКОА обеспечивает возможность качественного использования кресла детьми, пассажирами невысокого роста, инвалидами без посторонней помощи. Заложенные в ЭКОА новые технические решения могут быть применены в универсальных полуактивных многочастотных виброизолирующих опорах прецизионного оборудования [3, 4] и в поверхностях с обратимой адаптацией и регулируемой жесткостью для стоматологических кресел [5].

[1]. Липов Б.П. Эргономическая адаптивность и задачи улучшения защиты от ударных перегрузок. Электронный журнал «Труды МАИ», 2013. № 65. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35929> (дата обращения 22.10.2023).

[2]. Пористый поливинилформаль марки ТПВФ-ЗБФ. [Электронный ресурс]. URL: <https://chemtechnolog.com/products.html> (дата обращения 22.10.2023).

[3]. Патент на изобретение № 2699461 RU, Дата публикации: 05.09.2019. Способ обратимой адаптации и энергопоглощения кресла транспортного средства и устройство для его осуществления / Саяпин С.Н.; заявитель ИМАШ РАН.

[4]. Sayapin S.N. Energy-Absorbing Chair with Reversible Adaptation. Russian Engineering Research, 2023. Vol. 43. N 3, p. 240-245.

[5]. Sayapin S.N. A Universal Adaptable Support Surface with Reversible Adaptation and Adjustable Rigidity for Dental Chairs. Biomedical Engineering, 2023. Vol. 57. N 1, p. 9-13.

## Молекулярно-генетические алгоритмы представления информации

Степанян И.В., Леднев М.Ю.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
neurocomp.pro@gmail.com

На теоретической основе вибрационной генетической биомеханики [1] была разработана принципиальная схема молекулярно-электронного нейрокомпьютера, базисная технология которого адаптирована для кодирования цветных изображений, цифровых аудио- и видеосигналов высокого разрешения, структур и весовых коэффициентов нейронных сетей. Информация, представленная на основе новой биоматематической системы методов имеет выраженные голографические свойства. Обработка информации на основе молекулярно-генетических алгоритмов выгодна по ряду причин, среди которых помехозащищенность, возможность защиты информации и др. Среди дополнительных возможностей – получение высокоточных изображений ДНК в пространствах собственных физико-химических параметров. На рентгеновских снимках недостаточно чётко видна структура организации хроматина (рис. 1, а). При этом рентгеновское излучение является ионизирующим, оно взаимодействует с электронами, выбивая их из атомов и разрушая структуру молекулы. Параметрические пространства визуализации (рис. 1, б) обладают существенным преимуществом, позволяя строить функциональные отображения молекулярно-генетической информации с возможностью визуализации структуры ДНК в высоком разрешении и произвольном масштабе для идентификации участков генов и решения актуальных практических задач анализа и экспертизы [2, 3].

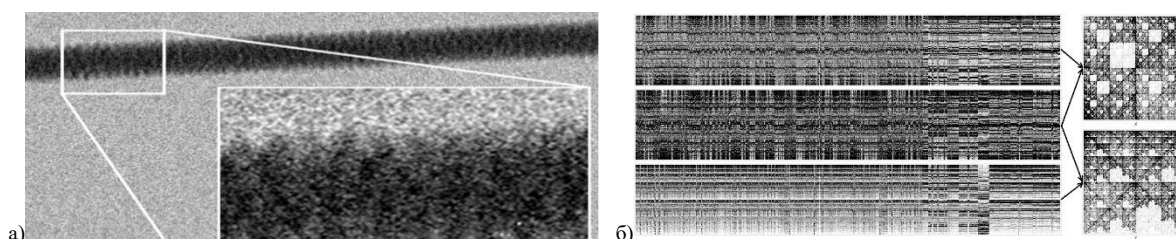


Рис. 1. а) Изображение ДНК, опубликованное в 2012 г в [4] и полученное с помощью трансмиссионной электронной микроскопии, виден периодический характер обмоток; б) Одномерные и двумерные проекции отображения фрагмента хромосомы человека в пространстве собственных физико-химических параметров

Обнаружен эффект упорядочивания информационной компоненты сигналов за счёт дробно-размерных свойств параметрического пространства. Данный эффект позволяет строить отображения для представления больших объёмов сложноструктурированной информации, что является основой для развития новых методов анализа больших данных, включая анализ биомеханических сигналов. Пример функциональной декомпозиции квазихаотического сигнала приведён на рис. 2.

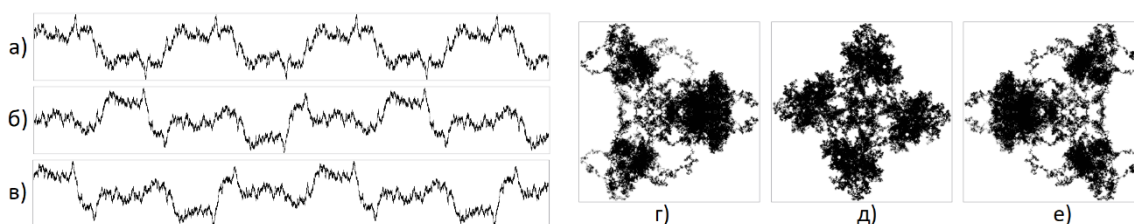


Рис. 2. Пример работы генератора псевдослучайных последовательностей, интегральная визуализация при  $N = 20000$ , длина последовательности 500000 нуклеотидов, проекции: а) X, б) Y, в) Z, г) XY, д) YZ, е) XZ, где X – пурины/пиримидины, Y – аминокетог, Z – две/три водородные связи

Результаты исследований были внедрены в деятельность одного из резидентов Сколково, доложены и одобрены 17.02.2022 на совместном заседании Научного совета ОНИТ РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно вычислительных и управляющих систем и материалов для её создания» и Научного совета ОНИТ РАН «Фундаментальные проблемы наноструктур и нанотехнологий» по теме "Нейроморфные системы и энергонезависимая память - 1". Заседание провёл академик РАН Г.Я. Красников.

[1]. Petoukhov S.V., Petukhova E.S., Svirin V.I. Genetic biomechanics, stochastic rules of genomes, and stochastic resonance. AIP Conference Proceedings 2697, 060002 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0111801>

[2]. Stepanyan I.V., Lednev M.Y. Chromatic Differentiation of Functional Mappings of the Composition of Nucleic Acids. Symmetry. 2023, 15(4):942, <https://doi.org/10.3390/sym15040942>

[3]. Stepanyan I.V. Functional Mapping of Biomechanical Properties of Deoxyribonucleic Acids. Symmetry: Culture and Science, Vol. 43, No. 2, 2023, 183-188, [https://doi.org/10.26830/symmetry\\_2023\\_2\\_183](https://doi.org/10.26830/symmetry_2023_2_183)

## Моделирование оптимальных параметров работы импульсных твердотопливных генераторов ударных волн

*Шведов И.М.*

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

swedigorr@gmail.com

Целью работы являлось моделирование нестационарных газодинамических режимов при работе импульсных твердотопливных генераторов ударных волн для определения оптимальных параметров разрушения породных массивов.

Применение взрывореактивного бурения скважин в горных породах является эффективным способом преодоления трудностей, связанных с бурением в сложных горно-геологических условиях пород различной крепости. Использование переносных взрывореактивных комплексов (ПВРК), использующих принцип работы импульсных твердотопливных генераторов ударных волн, позволяет значительно ускорить процесс бурения скважин, снизить затраты на оборудование и повысить качество разработки полезных ископаемых или выполнение иных задач в условиях, когда применение традиционных способов бурения весьма затруднительно [1, 2].

Для оптимизации режимов работы ПВРК необходимо моделирование формирования нестационарного газодинамического канала как источника силового поля давления, а также временных факторов самого взрывного импульса [3, 4].

Моделирование параметров взрывного импульса было выполнено для нестационарных газодинамических условий методом частотного анализа с помощью преобразований Фурье. Рассматривался импульс критических напряжений для области в массиве, где величина динамической нагрузки будет превышать предел прочности на разрушение. Для получения количественных данных были использованы ранее полученные результаты моделирования затухания амплитуд упругих колебаний ударной волны в массиве [5].

Для повышения эффективности процесса разрушения, управления таким процессом, необходимо формировать взрывной импульс так, чтобы распределение спектральной плотности импульса и резонансные свойства среды находились в соответствии друг с другом. Согласованность такой системы для частотного диапазона можно оценить, вводя некоторый коэффициент отношения амплитуд колебаний. Величину этого коэффициента можно оценить через отношение спектральных плотностей распределения взрывного импульса и отклика системы:

$$\varphi(\omega_n) = \frac{S_1(\omega_n)}{S_2(\omega_n)},$$

где  $S_1(\omega_n)$  – спектральная плотность амплитуд отклика в массиве на частоте  $\omega_n$ , м/Гц;  $S_2(\omega_n)$  – спектральная плотность амплитуд в центральном канале при работе импульсного генератора на частоте  $\omega_n$ , м/Гц [6].

На основе результатов проведенного моделирования были построены и проанализированы зависимости распределения спектральной плотности импульса напряжения в массиве и импульса давления в центральном рабочем канале импульсного генератора. Выработаны методические рекомендации для эффективной оптимизации импульсов давления в центральном канале и возникающих импульсов напряжения в массиве.

[1]. Разработка малогабаритных инициирующих модулей для твердотопливных пульсирующих взрывных устройств различного целевого назначения. Отчет о НИР № 10–08–00433 от 01.04.2010. РФФИ. 2012.

[2]. Solov'ev V.O., Shvedov I.M. The concept of improving the efficiency of explosive energy converters. J. of Physics. Conference Series. International conference on applied physics, power, and material science. 2019. P.012007

[3]. Гончаров С.А., Дугарцыренов А.В. Формирование импульса давления при взрыве скважинных зарядов на карьерах. ГИАБ, 2000. № 12 с. 31–36

[4]. Solov'ev V.O., Shvedov I.M. Investigation of the gas-dynamic processes in the operation of an explosion-reactive complex. Journal of physics. Conference series. Vol.1451, 2020, pp.1-5.

[5]. Соловьев В. О., Шведов И. М. Исследование особенностей скоростей роста трещин в горных породах при взрывореактивном способе их разрушения. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021, № 5, с 72–80.

[6]. Соловьев В. О., Шведов И. М. Разработка алгоритма вычисления эффективных параметров взрывного импульса при взрывореактивном разрушении породных массивов. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023, № 4, с.100-108.

## Концептуальный подход к использованию взрывореактивных комплексов для формирования отвалов в условиях высокой обводненности породного массива

<sup>1,2</sup>Шведов И.М., <sup>1</sup>Жоау А.А.

<sup>1</sup>Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

svirell@mail.ru

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Рассматривается концепция применения новых технологических решений в области ведения буровзрывных работ в сложных климатических и горно-геологических условиях с применением переносных взрывореактивных комплексов.

Потребность в разработке новых технических средств, способных повысить производительность разработки грунтов и пород в различных климатических условиях, представляет актуальность в решении проблемы устойчивости при формировании насыпей, отвалов из вскрыши, состоящей из высокодисперсных обводненных глинистых грунтов. Работа горных машин и механизмов в условиях высокой обводненности связана с проявлением высокой коррозионной активности поверхностей оборудования, сложностью маневрирования [1]. С другой стороны, негативное влияние обводненности влияет на выбор взрывчатых материалов, технологии заряжания скважин и способов формирования и инициирования зарядов. Поэтому традиционные способы ведения буровзрывных работ затруднительны, а порой и невозможны к применению из-за сложных гидрогеологических условий.

Решение проблемы представляется в использовании принципиально новых технических решений ведения взрывных работ с применением взрыва сосредоточенного заряда на выброс (ВВ - взрывчатых веществ). Применение модульных конструкций позволяет регулировать направление и высоту выброса, формировать оптимальную воронку выброса.

Концепция использования преобразователей энергии взрыва и технологическое решение нашли воплощение в переносном взрывореактивном комплексе (ПВРК) [2, 3].

Выполненная оценка применения ПВРК для регионов Дальнего Востока и Сибири со сложными климатическими и горно-геологическими условиями показала высокую эффективность [4, 5].

Это позволяет обосновать концептуальной подход к использованию модульных ПВРК для формирования отвалов в обводненных грунтах по следующим принципам:

1. Рабочий орган ПВРК состоит из набора герметичных одноразовых кассет, оснащенных разрушающимися отражателями, заполненными ВВ.
2. Комплекс работает на принципе безоткатности – происходит самопогружение в грунт с эффектом механической забойки.
3. Работа комплекса может осуществляться в любых сложных горно-геологических условиях, обеспечивая проходку в грунтах под любым углом к горизонту с направленным регулируемым по высоте выбросом, что позволяет формировать отвалы с заранее обоснованными устойчивыми бортами откосов.

[1]. Шведов И.М., Жоау А.А. Анализ развития коррозии горного оборудования, работающего в сложных климатических и горно-геологических условиях Анголы. В книге: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XVI Международной научно-практической конференции. Москва, 2023, с 332–335.

[2]. Соловьев В.О. Устройство для взрывореактивного бурения. РФ Патент 2064040, 1996.

[3]. Solov'ev V.O., Shvedov I.M. The concept of improving the efficiency of explosive energy converters. J. of Physics. Conference Series. International conference on applied physics, power, and material science.2019. P.012007

[4]. Соловьев В.О., Пацок В.В., Шведов И.М. Эффективность применения переносных взрывореактивных комплексов при проведении инженерно-строительных работ в сложных горно-геологических условиях Дальнего Востока. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 3, с. 99–109.

[5]. Франскевич А.А., Соловьев В.О. Оценка эффективности инженерных боеприпасов при пробитии протоки на реке Бурея и предложения по их совершенствованию. Проблемы машиностроения и автоматизации, 2020, №4, с.31-40.

## Экспериментальный анализ колебаний виброплатформы с обрабатываемым материалом при её контакте с упругим ограничителем

Шохин А.Е., Крестниковский К.В., Пановко Г.Я.

Институт машиноведения им. А.А. Благодирова РАН, Москва, Россия  
shohinsn@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному анализу динамики виброплатформы с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями в резонансной области частот при её взаимодействии с обрабатываемым материалом и упругим ограничителем колебаний с целью валидации разработанной ранее математической модели вибромашины и результатов анализа ее динамики [1].

Для выполнения экспериментального анализа был создан макет вибромашины с плоскими колебаниями рабочего органа, выполненного в виде упруго опертой металлической пластины с бункером для материала, которые возбуждаются двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями, вращающимися в противоположных направлениях (рис. 1). Для измерения колебаний макета используются три акселерометра: два акселерометра измеряют колебания в вертикальном направлении, и один – в горизонтальном. Угловые положения и скорости вращения дебалансов измеряются с помощью квадратурных энкодеров. Для получения искомых частотных характеристик макета, а именно – амплитуд колебаний и взаимной фазы вращения вибровозбудителей, эксперименты проводились при монотонном изменении частоты возбуждения с различным объемом материала (сухой строительный песок) в бункере.

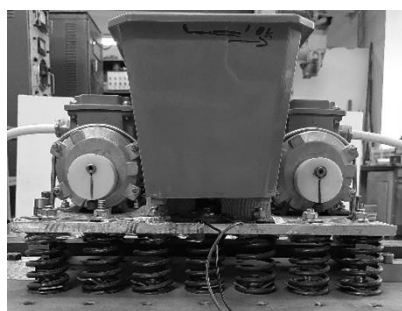


Рис. 1. Экспериментальный макет

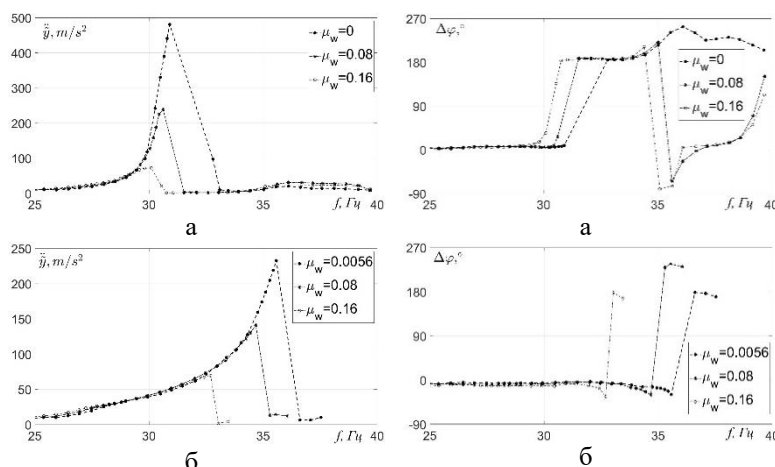


Рис. 2. Частотные характеристики в системе без ограничителя: а – АЧХ, б – взаимная фаза вращения

Рис. 3. Частотные характеристики в системе с ограничителем: а – АЧХ, б – взаимная фаза вращения

Исследуется диапазон частот вблизи второго резонанса системы, в котором реализуется синхронное вращение вибровозбудителей, с разностью фаз их вращения близкой к 0 градусам, в результате чего создается однонаправленная вынуждающая сила. На рис. 2 и рис. 3 представлены амплитуды вертикальных колебаний макета и взаимной фазы вращения вибровозбудителей от частоты возбуждения, соответственно для случаев колебаний без контакта и при контакте с ограничителем, установленным с исходным зазором 1 мм, при различных значениях относительной массы материала  $\mu_w = m_w/m_0$  ( $m_w$  - масса материала,  $m_0$  - масса системы без материала). Введение ограничителя колебаний способствует расширению области частот устойчивой синхронизации вибровозбудителей с взаимной фазой близкой к 0 градусам. В этой области частот наблюдается снижение чувствительности амплитуд колебаний к изменению массы материала. Полученные результаты подтверждают результаты математического моделирования и адекватность математической модели, представленные в [1]. Установленные эффекты расширения области частот синхронизации вибровозбудителей и снижения чувствительности амплитуд колебаний к изменению массы материала могут представлять практический интерес при разработке вибромашин резонансного типа.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского Научного Фонда, проект № 21-19-00183.

[1]. Panovko G., Shokhin A. Dynamics features of a resonant vibromachine with self-synchronizing inertial vibroexciters in the presence of vibration limiter. J. of Vibroengineering. 2021. Vol. 23. Iss. 8. P. 1727-1736.

## Развитие методов и средств пульсометрии

Явелов И.С., Рочагов А.В., Жолобов А.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
yishome@mail.ru

Рассмотрены этапы исследования и создания приборов мобильной медицины в области кардиомеханосигналов человека для диагностики сердечно-сосудистой системы. В последние годы идёт бурный рост развития гемодинамики, где нашли своё применение новые волоконно-оптические датчики (датчики давления), которые были применены для измерения кардиомеханосигналов человека (шумы, тоны и ряд других вибросигналов сердца и пульсовых волн давления). Целью использования разработанных в ИМАШ РАН датчиков является предложение для врача общей практики или более узкой специальности оперативно получить данные о состоянии не только сердечно-сосудистой системы пациента, но и всего организма в целом.

Диагностика по пульсу – это один из самых древнейших разделов Восточной медицины. История насчитывает более 5 000 лет ещё с времен Древних Тибета и Египта [1, 2]. Впервые появилась информация о подобных датчиках для измерения пульсовой волны в 1986 году, которые были предложены фирмой «АткорМедикэл» (Великобритания) на базе датчиков – катетеров фирмы «Миллар» (США), а позднее они усовершенствованы фирмой «Сфигмокор» (Австралия), являющейся до настоящего времени мировым лидером в области пульсометрии. В ИМАШ РАН предложены для исследования пульсовой волны датчики другого типа на базе волоконно-оптических преобразователей-зондов, отличительная особенность которых заключается в функциональной надежности и отсутствии каких-либо напылённых или приклеенных структур на механических мембранных элементах.

Подробнее остановимся на развитии вторичных электронных блоков для обслуживания волоконно-оптических датчиков и преобразования их сигналов в электрические с дальнейшей оцифровкой и передачей в компьютер. Примером вторичного блока служит показанный на рис. 1 прибор ПУЛЬС, сочетающий в себе один канал пульсовой волны, один канал электрокардиограммы (ЭКГ), что позволило совместить привычный для врача сигнал электрокардиограммы с сигналом пульсовой волны в синхронном режиме. В процессе развития данного направления прибор обогатился ещё двумя каналами – оптофонендограммы (ОФГ) и возможностью переводить анализатор пульсовой волны из режима мониторинга в режим записи в файл рукой пациента, то есть реализован канал фонендоскопии и врач, настроив датчики во время мониторинга, может производить запись, не отрывая рук от датчика пульсовой волны.



Рис. 1. Четырехканальный прибор кардиоанализатор ПУЛЬС

Прибор ПУЛЬС зарекомендовал себя при применении в кардиологии, в частности, при настройке кардиостимуляторов. При помощи кардиоанализатора можно проводить постоянное динамическое наблюдение за пациентами после имплантации кардиостимуляторов и осуществлять эффективный контроль по параметрам пульсовой волны и электрокардиограммы при перепрограммировании стимулятора и выбор оптимального режима его работы. Прибор ПУЛЬС неоднократно экспонировался на международных выставках и конкурсах изобретателей, где был удостоен дипломами и медалями.

Развитие новых информационных технологий привело к созданию беспроводных устройств для передачи полезных сигналов, применение которых освобождает прибор от значительного числа проводов и позволяет создавать аппаратуру, более удобную для пользователей [3].

Выводы. Применение кардиоанализатора пульсовой волны в поликлинической системе даст возможность врачу провести углубленное инструментальное экспресс-обследование сердечно-сосудистой системы человека, как на приёме, так и на выезде. Перспективным решением является использование приборов с беспроводной связью для мобильной медицины.

[1]. Гаваа Лувсан. Традиционные и современные аспекты восточной рефлексотерапии. М., 1986, 432 с.

[2]. Жолобов А.В., Явелов И.С., Попович В.А. Развитие медицины в области гемодинамики: историческая справка // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023 Т. 26 № 4 С. 15–27. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604136-202304-02>.

[3]. Явелов И.С. Механопульсография и основные феномены сердечно-сосудистой системы.- М.- Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2020.- 196 с.

*Секция №8*

**Фундаментальные исследования в реализации стратегических  
направлений развития виброакустики машин.**

**Председатель – Косарев О.И., д.т.н.**

**Секретарь – Нахатакян Ф.Г., д.т.н., [filnahat7@mail.ru](mailto:filnahat7@mail.ru)**



# О продольных осесимметричных модах вибро- и гидро-акустики цилиндрической трубы

Бырдин В.М., Пузакина А.К.

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

V\_M\_Byrdin@mail.ru

Анализируется структура и дисперсия продольных осесимметричных волн в цилиндре, окружённом жидкостью. Реальны моды: нормальные (прямые и обратные), поверхностные и вытекающие, а также втекающие. Задача отвечает одной из первых простых моделей ряда акусто-механических технических объектов. Труба, тоннель или инженерный объект под водой, в иле или грунте; элемент теплообменника или сейсмо-защиты и, в некотором смысле и приближении, кровеносный сосуд. При некоторых предельных значениях параметров системы проблема переходит в следующие частные, более простые задачи: о волнах Похгаммера в стержне или Лэмба в пластине, о поверхностных волнах вокруг тоннеля и волнах Рэлея в полупространстве. См. также наши более ранние работы в ИМАШ РАН [1–3].

1. Задача соответствует анализу ряда технических объектов – одна из первых, простых виброакустических моделей: 1) трубопровод в грунте, под водой или в иле; 2) подводный объект; 3) трубка-элемент энерго-объекта; 4) цилиндр/ сейсмо-элемент (рис. 1); 5) кровеносный сосуд; 6) цилиндр двигателя в статоре. И т.п. Жидкость, грунт, осадок рассматриваются как однородная среда динамической системы - физически, и как идеальная жидкость в математической модели. Труба – однородный металл. Внутри лёгкая среда, в пределе вакуум, что довольно приемлемо для моделируемых систем «сталь-вода, металл- топливо» и

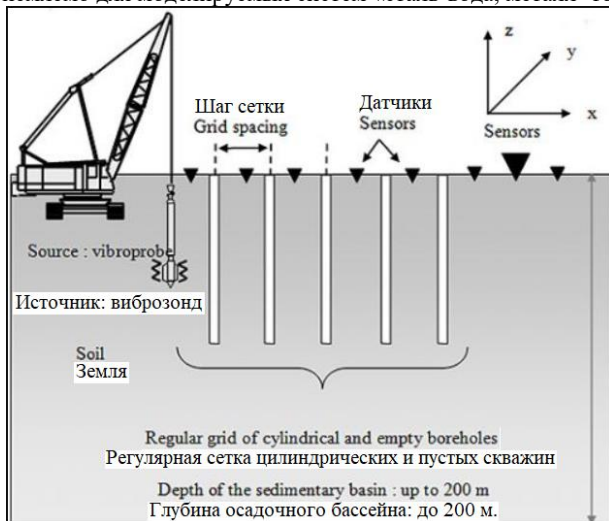


Рис. 1. О сейсмо-защитном сооружении от поверхностных волн; по [4, Brûlé S. и др., 2014, рис. 16].

жидкости и в стержне. Дисперсионное уравнение представляет собой определитель 5-го порядка с цилиндрич. функциями Бесселя и Неймана первого рода, 0-го и 1 порядков. Приоритет постановки задачи не столь важен; стандартный метод решения не вызывает сомнений – например, [1–3,5]. Весьма важно также соотношение собственных колебаний и бегущих волн в продольно ограниченных системах [1,2Б], наиболее типичных для технической механики.

3. Излучение в жидкости, пространственное распределение полей и дисперсионное уравнение. Краевая задача для уравнений (ур-й) Гельмгольца. Граничные условия типичны – 4 ур-я; 5-ое, дополнит. условие «недоопределённости...» задачи (для 5 неизвестных) – нулевая дивергенция векторного потенциала [в 3, 5, ...]. Получены аналитические выражения пространственных распределений полей колебательного давления, напряжений и смещений в жидкости и в твёрдом теле, как для мод бегущих волн, так и для стоячих мод:  $A_n(r) \exp i(k_n z - \omega t)$ ,  $A_n(r) \sin(k_n z) \exp i\omega t$  – обозначения общеприняты и поясняются в докладе. Поле отдельной моды в жидкости определяется потенциалом с функцией Ганкеля 1-го рода 0-го порядка:  $\Phi_G(r) = C_G H_0^{(1)}(\xi)$ ,  $\xi = \beta r$ ,  $\beta = (k_g^2 - k^2)^{1/2}$ . Функция Ганкеля определяет цилиндрический фронт волны,  $H_0^{(1)} \exp(-i\omega t)$ , и асимптоту на бесконечности,  $A \sim (\beta r)^{-1/2} \exp i(\beta r)$ ,  $|\beta r| \gg 1$ . Колебательные деформации в стержне также определяются через потенциалы, скалярный и векторный, с амплитудами  $C_\kappa$  и  $D_\kappa$  ( $\kappa = 1, 2$ ) и с цилиндрическими функциями:

$$\Phi(r) = C_1 J_0(\xi) + D_1 N_0(\xi), \quad \Psi(r) = e_2 [C_2 J_1(\xi) + D_2 N_1(\xi)]; \quad \xi_\kappa = (k\kappa^2 - k^2)^{1/2} r; \quad k_\kappa = \omega/c_\kappa, \quad \kappa = \tau/T \text{ или } 1/L.$$

Дисперсионное ур-е (ДУ) – матрица 5-го порядка, 120 слагаемых, сводится до 72!

4. Предпринят качественный предварительный анализ ДУ, волновых полей и прикладных задач.

- [1] Косарев О.И. Дисперсионное уравнение цилиндра в жидкости ...// Проблемы маш. и надежности машин. 2019. № 6. С. 49-58.
- [2] Бырдин В.М., Гаврилова Г.И., Пузакина А.К. Волновая динамика слоистых структур// 3-я Междун. конф. «Проблемы динамики и прочности механ. и машин». Астрахань: АГТУ, 2007. С. 132–133. Б) Бырдин В.М. 1. Продольные моды полого стержня ... 2. Сингулярные бидувкратные ...// Семинар отдела Вибро-био-акустики ИМАШ РАН. М., 12.2009.
- [3] Бырдин В.М., Мамонова М.Г. ОВ-моды пластин, стержней и оболочек // Проблемы маш. и автоматиз. 2011. № 1. С. 81-91.
- [4] Жавхлан Саруул. Сейсмические барьеры для защиты зданий и сооружений от поверхностных волн. Дисс. ... к.т.н. М., 2023. 110с.
- [5] Лепендин Л.Ф. Акустика.– М.: Выш. шк., 1978. 298 с.

т.п., когда плотность жидкости на порядок меньше плотности твёрдого тела  $\rho < 1$ , см., например, в [3,5]. При некоторых значениях параметров (коротковолновых ВЧ мод, при больших, малых или нулевых радиусах цилиндра и в сравнении с длиной волны) проблема переходит в частные, более простые задачи. Это нормальные волны Похгаммера в стержне, Лэмба в пластине, поверхностные волны вокруг тоннеля и сейсмологические волны Рэлея в полупространстве.

2. Продольные осесимметричные моды системы – полой стержень в жидкости. Корректно ставится задача о собственных упругих колебаниях и волнах бесконечного цилиндра в жидкости, среды однородны изотропны. Дается аналитическое решение. Колебания осесимметричны, т.е. независимы от азимута и без угловой компоненты смещений. Нормальные, поверхностные и вытекающие волны и соотв. стоячие моды колебаний. Исследуется спектр, вкл. обратные волны, и амплитудное распределение поля в

## Оценка эффективности метода SMART комплекса ANSYS

Жиркевич В.Ю.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
basiliuss@gmail.com

Целью работы является оценка эффективности технологии трехмерного моделирования процесса развития трещин SMART, примененной в составе программного комплекса ANSYS. Идея состоит в проведении серии тестовых расчетов с применением метода SMART, последующим сравнением результатов с известными экспериментальными данными и анализом выявленных совпадений либо несоответствий.

В качестве объекта изучения была принята двойная консольная балка (ДКБ) и крестообразный образец при двухосном растяжении. Такие объекты применительно к самолетным алюминиевым сплавам подробно исследовались при сложном напряженном состоянии в экспериментальных совместных работах NASA и компании Boeing [1], а позже силами ЦАГИ проводились аналогичные отечественные исследования [2]. В названных исследованиях, не смотря на плоское нагружение, было выявлено существенно трехмерное поведение объектов – образующаяся трещина в большинстве случаев демонстрировала заметное отклонение фронта трещины от нормали к плоскости образцов. Расхождение трещин на противоположных сторонах образцов оказывается соизмеримо с толщиной образца, что делает обоснованным применение метода SMART, разработанного для общего случая трехмерных объектов с развивающимися трещинами.

Не смотря на значительный разброс в экспериментальных данных, был выявлен ряд систематических отличий от них, свойственных результатам компьютерного моделирования разрушения соответствующих образцов по технологии SMART. Типичная картина расчетной и экспериментальных траекторий показана на рис. 1 на примере траекторий, оказавшихся при имеющемся разбросе результатов экспериментов ЦАГИ наиболее близкими к расчетной. На рисунке видно, что траектория, рассчитанная по методу SMART, на начальном этапе идет заведомо круче, а в дальнейшем, напротив, более полого, чем соответствующие траектории как для статического (Static), так и для усталостного (Fatigue) разрушения. Кроме того, было замечено, что моделирование по методу SMART приводит к практическому отсутствию отклонения фронта трещины от нормали к поверхности образца, а также к нарушению характерной для реальных крестообразных образцов картины ассиметричного развития трещин с разных концов начальной трещины.

Инструмент SMART на данный момент обладает рядом существенных ограничений: предполагается, что поведение материала может быть только линейно-упругим и изотропным, в зоне развития трещины может использоваться только один материал; не допускаются эффекты пластичности и нелинейной геометрии; не поддерживаются любые контакты в зоне переформирования сетки, а также команды соединения, и ряд других. Но разработчики обещают снять большую часть этих ограничений в ближайших версиях.

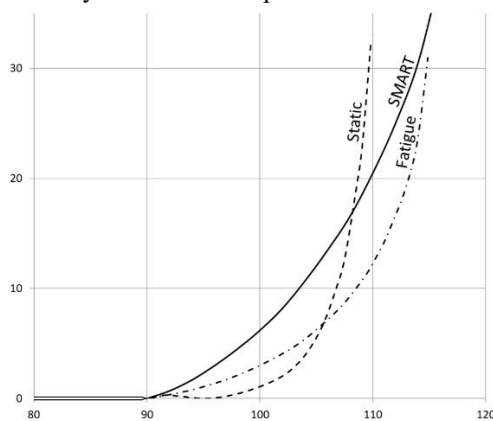


Рис. 1. Сравнение характерных траекторий трещин

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие основные выводы:

- реализованный в ANSYS метод SMART в целом верно отражает качественную картину образования трещин в трехмерных объектах;
- программа пока содержит ряд существенных ограничений, а также несовершенств, проявляющихся в неполном соответствии поведения трещин наблюдаемым в реальности;
- метод SMART является многообещающей разработкой, которая в ближайшем будущем приведет к появлению удобного инструмента решения задач, связанных с моделированием эффектов механики разрушения.

[1]. Pettit R.G., Wang J.J., Toh C. Validated Feasibility Study of integrally Stiffened Metallic Fuselage Panels for Reducing Manufacturing Costs. NASA/CR-2000-209342. 2000, 132 p.

[2]. Березин А.В., Кулемин А.В., Нестеренко Б.Г., Нестеренко Г.И. Поворот трещин. Научный вестник МГТУ ГА. 2008, №130, с. 26-32.

# Излучение цилиндрической оболочки в жидкости при произвольном распределении колебательной скорости

Косарев О.И.

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

Рассмотрено излучение колеблющейся упругой цилиндрической оболочки в жидкости, имеющее важное прикладное значение и остающееся актуальным. Анализ множества работ, посвященных решению данной задачи, показал, что решения, существенно различаются и не имеют единой теоретической основы. Причины различий обусловлены типом оболочек (конечные, ограниченные, бесконечные), местом определения излучения оболочек - в ближнем или в дальнем поле [1,2]. Например, формула звукового давления поля, излучаемого конечной цилиндрической оболочкой, предложенная в [2]

$$p^*(r, z) = \frac{\rho \omega^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B(\gamma) H_n^{(2)}(r\sqrt{k^2 - \gamma^2}) e^{i\gamma z}}{\sqrt{k^2 - \gamma^2} H_n^{(2)'}(a\sqrt{k^2 - \gamma^2})} d\gamma .$$

Цель исследований - получить точное решение задачи излучения колеблющейся цилиндрической оболочки в жидкости. Рассматривается излучение боковой поверхности оболочки радиуса  $a$  и длины  $L$  в цилиндрической системе координат  $r, z, \varphi$ . Продольная ось оболочки совмещена с осью  $z$ . Наличие торцевых крышек и экранов не учитывается, оно должно быть рассмотрено отдельно.

Волновое уравнение в цилиндрической системе координат  $r, z, \varphi$ , описывающее излученное звуковое поле, имеет вид [2]

$$\left( \frac{1}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{rR} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \Psi} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} \right) + \left( \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 T}{T \partial t^2} . \quad (1)$$

Решение уравнения (1) записывается в виде  $\Phi=R(r)Z(z)\Psi(\varphi)T(t)$ . Это решение относительно давления  $p$  звукового поля можно представить в виде (без суммирования по гармоникам  $n$ ) [2]

$$p(r, z) = A_n H_n^{(2)}(r\sqrt{k^2 - k_z^2}) e^{ik_z z} \quad (2)$$

где  $A_n$  - искомый коэффициент,  $H_n^{(2)}(rk_r)$  - функция Ганкеля второго рода. Коэффициент  $A_n$  определяется из граничного условия на поверхности оболочки

$$w(z) = \frac{1}{\omega^2 \rho} \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=a} \quad (3)$$

где  $w(z)$  - радиальное колебательное перемещение оболочки,  $\rho$  - плотность жидкости,  $\omega=2\pi f$  - угловая частота,  $a$  - радиус оболочки. Из (2) с учетом (3) получим

$$p(r, z) = \frac{\rho \omega^2 H_n^{(2)}(r\sqrt{k^2 - k_z^2})}{\sqrt{k^2 - k_z^2} H_n^{(2)'}(a\sqrt{k^2 - k_z^2})} w(z) \quad (4)$$

В формуле (4) определим параметр  $k_z$ . Решение уравнения (1) получают, исходя из условий [2]

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 T}{T \partial t^2} = -k^2 \quad \left( \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \right) = -k_z^2 \quad \left( \frac{1}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{rR} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \Psi} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} \right) = -k_r^2$$

где  $k, k_z, k_r$  произвольные постоянные числа, находящиеся в соотношении

$$k_r^2 + k_z^2 = k^2 \quad (5)$$

Из анализа физического смысла этих чисел с учетом  $T=\exp(i\omega t)$  и  $Z=\exp(ik_z z)$  определим:  $k=\omega/c$  - волновое число,  $k_z$  - волновое число звуковой волны, распространяющегося в направлении координатной оси  $z$ ,  $k_r=k\sin\theta$ ,  $k_z=k\cos\theta$ , где  $\theta$  - угол между вектором волнового числа  $k$  и осью  $z$ . Подставив  $k_z$  в (4), получим формулу в окончательном виде [3]

$$p(r, z) = \frac{\rho \omega^2 H_n^{(2)}(rk \sin\theta)}{k \sin\theta H_n^{(2)'}(ak \sin\theta)} w(z) . \quad (6)$$

Формула (6) отличается от формулы (4) Скучика [1] тем, что в ней определено волновое число  $k_z$ . В формуле (6) отсутствуют признаки типа оболочки (конечная или бесконечная). Важно понимать, что в формуле (6) параметры  $r, \theta$  и, следовательно,  $k_z=k\cos\theta$  не вычисляются, а задаются, исходя из физических условий решаемой задачи. Эти параметры характеризуют звуковое поле безотносительно к конкретному источнику излучения. Величина  $r$  может быть задана в пределах ближнего поля, начиная от  $r=a$ . В ряде задач угол  $\theta$  известен. Формула универсальна и пригодна для решения всех задач гидроакустики цилиндрических оболочек.

[1] Скучик Е. Основы акустики. Т.2.М.:Мир, 1976. 542 с.

[2] Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. - Л.: Судостроение, 1972. 349 с.

[3] Косарев О.И. Точное решение задачи излучения цилиндрической оболочки в жидкости// Проблемы машиностроения и надежности машин. №2. 2023. с.

# Арбитражная методика измерительного контроля крутильных колебаний роторных машин

Назолин А.Л.

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

## Цель работы

Несмотря на то, что в мире активно развиваются средства и методы измерительного контроля крутильных колебаний роторных машин, проблема повышения точности восстановления сигнала угловой вибрации вала по результатам бесконтактных измерений моментов времени прохождения валом фиксированных угловых положений остается актуальной.

## Состояние проблемы

В измерениях крутильных колебаний методом временных интервалов кроме сигнала угловой вибрации содержится «паразитная» информация о других влияющих факторах и физических процессах, а именно: погрешности расположения маркеров углового положения вала, поперечных колебаниях вала относительно мест установки датчиков угловых маркеров вала, поперечной вибрации корпуса в месте установки датчика, изменения частоты вращения вала. Существующие методики измерений [1] учитывают вклад лишь некоторых из них, что не позволяет восстановить сигнал угловой вибрации вала без существенных погрешностей и ошибок, особенно на частотах вынужденных крутильных колебаний, кратных частоте вращения вала.

## Методы исследования

Решение проблемы повышения точности восстановления сигнала угловой вибрации вала по результатам временных измерений ищется путем разработки оригинальных схем измерений и математических моделей влияния «паразитных» факторов на восстанавливаемый сигнал угловой вибрации. По результатам исследований впервые получены аналитические формулы оценки угловой вибрации вала по результатам бесконтактных временных измерений, учитывающие все перечисленные выше факторы. На разработанное устройство и способ измерений крутильных колебаний получен патент на изобретение РФ [2].

Для экспериментальной проверки возможности использования крутильных колебаний в диагностических целях создан программно-технический комплекс (ПТК) мониторинга крутильных колебаний роторных машин [3, 4], обеспечивающий наилучшую (по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами) точность измерения угловой вибрации вала во всем диапазоне частот возбуждения.

## Результаты и их обсуждение

Учет влияния полного перечня влияющих факторов позволяет рассматривать разработанную экспериментальную методику оценки крутильных колебаний в сечении вала и угла закрутки вала между сечениями методом временных интервалов как арбитражную. С использованием полученных аналитических формул связи временных интервалов с углом поворота вала проведен сравнительный анализ существующих измерительных схем и методик измерений крутильных колебаний роторных машин методом временных интервалов, показаны их достоинства и недостатки. Описаны причины, вызывающие ошибки измерений крутильных колебаний.

Проведена экспериментальная апробация ПТК на валопроводе турбоагрегата мощностью 350 МВт, подтвердившая возможность регистрации частот крутильных колебаний до 450 Гц во всех режимах работы турбоагрегата. Рассмотрены причины возбуждения крутильных вибраций валопроводов турбоагрегатов и способы их идентификации, пути решения проблемы оценки напряженно-деформированного состояния валопровода в динамике и раннего диагностирования дефектов целостности валопровода в процессе эксплуатации.

По результатам мониторинга крутильных колебаний и моделирования динамики валопровода турбоагрегата 350 МВт с трещиной усталости вала [1] показано, что мониторинг изменения собственных частот крутильных колебаний валопровода турбоагрегата позволяют обнаруживать трещины вала, начиная с 35% площади сечения вала. Учет влияния режимных параметров на измерения значений собственных частот крутильных колебаний методами множественной регрессии показал возможность более раннего обнаружения трещин усталости вала в том числе наиболее трудно обнаруживаемых кольцевых, начиная с 2...5% площади сечения вала [5], что является лучшим результатом среди известных методов оперативной диагностики.

[1]. Назолин А.Л., Поляков В.И., Гнездилов С.Г. Диагностика целостности валопроводов по крутильным колебаниям // Теплоэнергетика. 2020. № 1. С.32-43.

[2]. Устройство и способ мониторинга крутильных колебаний вращающегося вала (варианты): Патент 2782741 РФ / А.И. Куменко, А.Л. Назолин, В.И. Поляков. Заявл. 07.09.2021 // 2022. Бюл. № 31.

[3]. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Поляков В.И. Прецизионная оптико-электронная система мониторинга крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // ДАН. 2017. Т. 472. № 2. С. 145-149.

[4]. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Физические основы построения оптико-электронных систем измерительного контроля крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // Физические основы приборостроения. -2016. -Т.5. -№ 3(20)–С. 30-38.

[5]. Способ обнаружения усталостного повреждения вала турбоагрегата : Патент 2579639 РФ / Морозов А. Н., Назолин А. Л., Поляков В. И. Заявл. 05.05.2013 // 2012. Бюл. №32.

## К вопросу продольной модификации зубьев зубчатых колес

Ф. Г. Нахатакян, А.К. Пузакина, Д.Ф.Нахатакян

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

e-mail: filnahat7@mail.ru

В работе исследована проблема повышения нагрузочной способности зубчатых передач при перекосе путем продольной модификации боковых поверхностей зубьев. Известно, что упругие деформации элементов передачи, а также погрешности их изготовления и сборки приводят к перекосу и начальному неприлеганию зубьев, в результате которого возникают концентрации контактных напряжений, что сильно снижает нагрузочную способность передачи [1-3].

Наиболее эффективным методом снижения концентрации контактных напряжений в результате перекоса является продольная модификация зубьев [4-6]. Несмотря на то, что продольная модификация приводит к возрастанию уровня контактных напряжений по сравнению с номинальным (линейным) касанием зубьев, в передачах при перекосе путем использования продольной модификации зубьев, можно добиться значительного снижения концентрации контактных напряжений на зубьях (рис. 1).

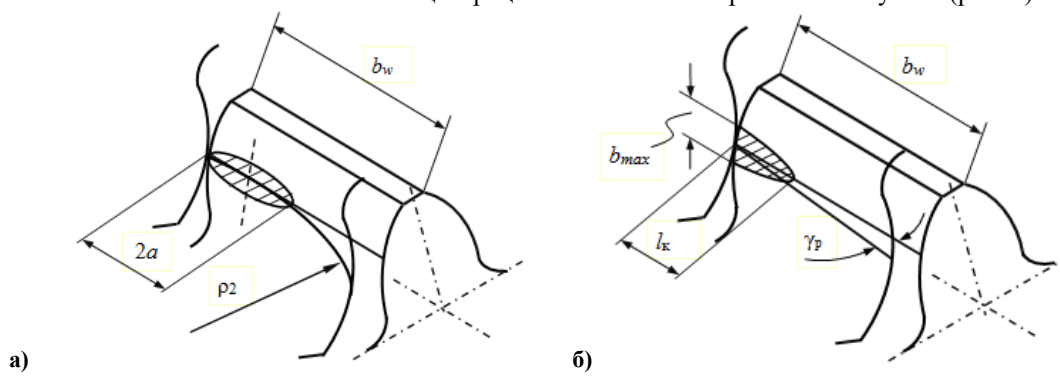


Рис. 1

а) Контакт зубьев с продольной модификацией при наличии перекоса;  
б) Контакт зубьев без продольной модификации в условиях перекоса

В работе параметры продольной модификации определялись из двух условий. Во-первых, площадка контакта зубьев с продольной модификацией не должна выходить на торец зуба (рис. 1, а), поскольку это приведет к концентрации контактных напряжений, и во-вторых, контактные напряжения  $\sigma$  при перекосе на зубьях с продольной модификацией, должны быть в  $m$  раз меньше напряжений  $\sigma_\gamma$  на зубьях без продольной модификации, т.е. чтобы имел место положительный эффект от модификации.

Таким образом, можно записать, во-первых  $a \leq 0,5b_w - \rho_2\gamma$ , где  $a$  - половина длины площадки контакта зубьев с продольной модификацией;  $b_w$  - длина зуба;  $\rho_2$  - приведенный радиус кривизны зубьев в продольном направлении;  $\gamma$  - угол перекоса в зацеплении, и, во-вторых  $\sigma \leq \sigma_\gamma / m$ , где  $\sigma$  - контактные напряжения зубьев с продольной модификацией;  $\sigma_\gamma$  - контактные напряжения на зубьях без продольной модификации в условиях перекоса; параметр  $m$  - показатель эффективности продольной модификации, он показывает во сколько раз контактные напряжения на зубьях с продольной модификацией должны быть меньше контактных напряжений без продольной модификации в условиях перекоса.

В работе задача решена аналитически, для радиуса продольной модификации  $\rho_2$  получена формула  $\rho_2 = m^4 \frac{P^{1/3} \rho_1^{1/3}}{2A_0^4 E^{1/3} \gamma}$ , где  $\rho_1$  - приведенный радиус кривизны зубьев в поперечном сечении;  $P$  - сила в зацеплении; константа  $A_0$  при сделанных в работе допущениях, равна 0,655.

Расчеты, при варьировании угла перекоса, на конкретных примерах показали, что эффективность от продольной модификации, (по сути повышение нагрузочной способности), составила  $m = 1,24 \dots 1,31$  во всем диапазоне изменения угла перекоса.

1. Нахатакян Ф.Г. Контактные напряжения и деформации цилиндров при перекосе // Вестник машиностроения. 2011. № 10. с. 45-48.
2. Айрапетов Э.Л., Айрапетов С.Э., Мельникова Т.Н. Расчет контактных перемещений в передачах зацеплением с локализованным контактом зубьев // Вестник машиностроения, 1985, №12, с. 6- 8.
3. Нахатакян Ф.Г. Контактное взаимодействие цилиндров при наличии перекоса // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 4. С. 91-94.
4. Антонюк, В.Е. Продольная модификация зубчатых колес планетарных передач мобильных машин / В.Е. Антонюк, В.Я. Павловский, С.Н. Поддубко, В.С. Александрова, И.Н. Николаенкова // Механика машин, механизмов и материалов. 2011. №4(17). С.37-41.
5. Нахатакян Ф.Г. Повышение нагрузочной способности зубчатой передачи в условиях перекоса снижением контактных напряжений с помощью продольной модификации зубьев // Вестник машиностроения. 2021. № 12. С. 13-16.
6. Wei Y. G., Tang W. C. The Edge Effect and Longitudinal Modification of Involute Gear Drive Used in Automobile // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol 367. P. 136-140.

## Угол перекося в зубчатых передачах и его предельно максимальное значение

Ф. Г. Нахатакян, А.К. Пузакина, Д.Ф.Нахатакян

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

e-mail: filnahat7@mail.ru

При расчёте нагруженности и прочности зубчатых зацеплений необходимо учитывать снижение их нагрузочной способности из-за угла перекося  $\gamma$  зубчатых колес [1-9]. Следует отметить, что даже при небольших значениях угла  $\gamma = (0,1 \dots 1)10^{-3}$  рад, нагрузочная способность передач снижается в 2...15 раз, что является недопустимым [3]. Поэтому максимально допустимое значение угла перекося  $[\gamma]$  является важным параметром при прочностных расчётах, долговечности передачи, износа элементов передачи, а также максимальных контактных напряжений [10-13].

В работе предложен метод и на его основе решена задача по определению этого параметра. Суть его заключается в следующем. Известно, что условие прочности зубьев зубчатых колес на контактную прочность при перекося имеет вид

$$\sigma_{\gamma} \leq [\sigma_H], \quad (1)$$

где  $[\sigma_H]$  – допускаемое контактное напряжение;  $\sigma_{\gamma}$  – контактные напряжения зубьев при перекося, согласно результатам работы [8]  $\sigma_{\gamma} = K_{\sigma}\sigma_H = \sqrt{K_{\gamma}}\sigma_H$ ; здесь  $\sigma_H$  – контактные напряжения по Герцу [14];  $K_{\sigma}$  – коэффициент концентрации контактных напряжений;  $K_{\gamma}$  – коэффициент угла перекося, согласно работе [8] определяется как  $K_{\gamma} = 1 + 0,5\xi$ , при  $\xi \leq 2$  (т.е.  $l_k = l$ ), и  $K_{\gamma} = \sqrt{2} \cdot \xi^{1/2}$ , при  $\xi \geq 2$  (т.е.  $l_k \leq l$ ); здесь  $\xi = l\gamma / \alpha_H$  – безразмерный нагрузочный параметр;  $l$  – длина контактной линии, для прямозубых колес при номинальном контакте она совпадает с длиной зуба;  $\alpha_H$  – контактная деформация в отсутствие перекося.

С учетом сказанного, условие прочности (1) можно преобразовать к виду  $\sigma_{\gamma} = \sqrt{1 + 0,57\xi^{0,8}} \times (\xi \leq 2)$   $\times (2\pi(1 - \nu^2))^{-0,5} \sqrt{qE/R} \leq [\sigma_H]$ , отсюда для безразмерного нагрузочного параметра несложно получить соотношение  $\xi \leq [1,75R[\sigma_H]^2 / a_1^2 qE - 1,75]^{5/4}$ , и наконец для допустимого угла перекося  $[\gamma]$  окончательно получаем формулу в виде  $[\gamma] \leq (\alpha_H / l) [10R[\sigma_H]^2 / qE - 7/4]^{5/4}$ .

Расчёты по последней формуле для зубчатой передачи из примера расчёта ГОСТ [15] показали, что при варьировании погонной нагрузки в диапазоне 214...513 Н/мм, допустимый угол перекося изменяется в пределах  $(7,81 \dots 0,39) \times 10^{-4}$  рад, а для нагрузки 427 Н/мм, что имеет место в рассматриваемом примере, он равняется  $1,187 \times 10^{-4}$  рад, что согласуется с расчетом в ГОСТ.

Таким образом, предложен новый подход для определения важного параметра для прочностного расчета – предельного угла перекося в зубчатых зацеплениях.

1. В.И. Короткин, Д.А. Газзаев, Д.Ю. Сухов Контактная напряженность прямых зубьев эвольвентных зубчатых передач в условиях перекося в зацеплении // *Известия вузов. северо-кавказский регион. технические науки*. 2011. № 4. Стр.83-87.

2. Han X., Hua L., Deng S., Luo Q. Influence of alignment errors on contact pressure during straight bevel gear meshing process // *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 2015. T. 28. № 6. С.1089-1099

3. Попов А.П., Каиров А.С. Контактная прочность эвольвентного зацепления с учетом перекося зубчатых колес // *Прогресивні технології і системи машинобудування*. 2007. № 2 (34). С.183-188

4. Короткин В.И., Колосова Е.М., Онишков Н.П. Оценка нагрузочной способности химико-термически упрочненных зубчатых передач с локальным контактом зубьев // *Вестник машиностроения*. 2020. № 8. С. 34-37.

5. Нахатакян Ф.Г. Контактные напряжения и деформации цилиндров при перекося // *Вестник машиностроения*. 2011. № 10. Стр. 45-48.

6. Korotkin V.I. Increasing the useful life and load-bearing capacity of the drives of oil pumping units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. T. 54. № 3-4. С. 165-171

7. Proskokov A.V., Yanyushkin A.S. Calculation of stress-strain state and contact stresses in the process of chip formation // *Solid State Phenomena*. 2021. T. 313. С. 59-65

8. Нахатакян Ф.Г. Контактное взаимодействие цилиндров при наличии перекося // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2012. № 4. С. 91-94.

9. Дорофеев В.Л., Голованов В.В., Гукасян С.Г., Дорофеев Д.В. Отображение погрешностей и контактных напряжений в зубчатых передачах многозначными и многолиственными функциями // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2016. № 5. С. 402-412.

10. Yu L., Wang G., Zou S. The calculation of meshing efficiency of a new type of conical involute gear // *Strojnicki Vestnik*. 2017. T. 63. № 5. С. 320-330.

11. Гоман А.М., Ишин Н.Н., Скороходов А.С., Старжинский В.Е. Расчёт предельного угла перекося цилиндрических зубчатых колёс // *Известия тульского государственного университета. технические науки*. 2011. № 5-2. Стр.176-190.

12. Иванов С.Л., Кузькин А.Ю., Скутельник В.В. Допустимый угол перекося осей зубчатых передач механических трансмиссий машин // *Вестник иркутского государственного технического университета*. 2017. № 9. Стр.210-217.

13. Нахатакян Ф.Г., Нахатакян Д.Ф. Оценка величины допускаемого угла перекося в зубчатом зацеплении // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 3. С. 45-49.

14. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 2. // Под ред. д-ра наук И.А. Биргера и чл. - корр. АН Латвийской ССР Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 463 с.

15. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. М.: Из-во стандартов. 1988. 127 с.



## Повышение нагрузочной способности зубчатой передачи с помощью кольцевых канавок

Ф.Г.Нахатакян, А.К.Пузакина, Д.Ф.Нахатакян, Я.П.Зенкина  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия  
e-mail: filnahat7@mail.ru

В работе исследуется так называемая зубчатая передача с адаптированными свойствами. Такие передачи используются для повышения нагрузочной способности зубчатых зацеплений путем уменьшения максимальных контактных напряжений с помощью увеличения контактной податливости зубьев, работающих в условиях перекоса. Например, в работах [1-6] предлагается конструкция зубчатых колес с адаптивными свойствами, в которых зубья имеют три кольцевые канавки, т.е. зуб делится на 4 равные участки, при этом задача решается численными методами для конкретных параметров.

В настоящей работе рассмотрены зубчатые колеса с кольцевыми канавками зубьев (рис. 1), разделенных на произвольное количество  $n$  частей, при этом задача решена в общем виде, аналитически.

Теоретическая основа метода адаптивных зубчатых передач, по сути, заключается в увеличении податливости зацепления при перекосе путем уменьшения длины зуба с помощью кольцевых канавок.

В работе расчетная схема такого зуба для определения параметров контакта построена по следующим соображениям. Известно [7], что зуб по длине деформируется, при этом расчетный угол перекоса  $\gamma$  определяется (рис.2) по зависимости  $\gamma = \gamma_T - \gamma_D = -\gamma_T (1 - \gamma_D / \gamma_T)$ , где  $\gamma_D$  деформативная составляющая угла перекоса между образующими зубьев;  $\gamma_T$  – технологический (исходный) угол перекоса. Важно отметить, что чем больше податливость зуба, тем больше  $\gamma_D$ , и соответственно меньше  $\gamma$ .

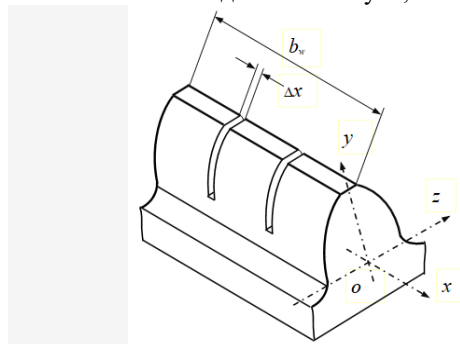


Рис.1. Зуб зубчатого колеса с кольцевыми канавками

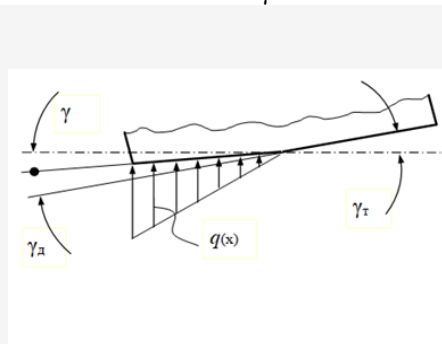


Рис.2. Расчетная схема деформирования зуба

Таким образом, проблема по определению параметров зубчатой передачи с кольцевыми канавками, по сути, сводится к корректному определению расчетного угла перекоса  $\gamma$  с учетом компенсирующей его величины при повышенной податливости системы.

Для его определения в работе получены величины:  $\gamma_D^{ал} = 5,5nP / b^2 E$ ,  $K_\gamma = 1 + 0,57 \xi^{4/5}$ ,  $\xi^{ал} = b\gamma / \Delta_k^{ал}$ , и наконец, контактные напряжения согласно работе [8] можно определить  $\sigma_\gamma = K_\sigma \sigma_H$ , где  $K_\sigma$  – коэффициент концентрации контактных напряжений при перекосе определяется [9]  $K_\sigma = \sqrt{K_\gamma}$ .

Расчеты показали, что в результате увеличения податливости зуба с помощью кольцевых канавок, контактные напряжения уменьшаются на 8...24% в зависимости от угла перекоса, тем самым повышается нагрузочная способность передачи. Эти результаты согласуются с имеющимися в литературе численными расчетами МКЭ [10].

1. Korotkin V.I. Increasing the useful life and load-bearing capacity of the drives of oil pumping units // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Т. 54. № 3-4. С. 165-171

2. Горленко О.А., Макаров Г.Н. Проектирование прямозубых цилиндрических передач при условии минимизации контактных напряжений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 9 (204). С. 12-14.

3. Горленко О.А., Шалыгин М.Г., Макаров Г.Н. Устранение кромочного контакта зубьев зубчатых колес планетарных передач // Строительные и дорожные машины. 2017. № 8. С. 38-42.

4. Макаров, Г.Н. Повышение контактной выносливости зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых передач / Г.Н. Макаров, И.О. Шныриков, О.А. Горленко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – №6. – С. 25-27.

5. Бородин, А.В. Влияние кольцевых прорезей на податливость зубчатых колес / А.В. Бородин, Т.В. Вельгодская, И.Л. Рязанцева // Техника машиностроения. – 2001. - №2. – С. 78-82.

6. Малинкович, М.Д. Исследование процесса зацепления цилиндрических зубчатых передач / М.Д. Малинкович // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - №3. - С. 32-37.

7. Айрапетов Э.Л., Нахатакян Ф.Г. Влияние изгибной деформации зубьев прямозубых цилиндрических передач на параметры контакта зубьев // Вестник машиностроения. 1990. № 8. С. 21-23.

8. Нахатакян Ф.Г. Контактные напряжения и деформации цилиндров при перекосе // Вестник машиностроения. 2011. № 10. Стр. 45-48.

9. Нахатакян Ф.Г. Контактное взаимодействие цилиндров при наличии перекоса // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 4. С. 91-94.

10. Макаров Г.Н. Повышение надежности зубчатых передач трансмиссий сельскохозяйственной техники // Аэкономика: экономика и сельское хозяйство, 2017. № 7 (19).



# Задача о точечном упругогидродинамическом контакте с учётом скачка нагрузки

Пановко М.Я.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия  
mpanovko@yandex.ru

Задачи об упругогидродинамической (УГД) смазке сосредоточенных контактов обычно формулируются без учёта сил инерции (контакт безмассовых тел) в предположении о равенстве реакции смазочной плёнки внешней нагрузке. В работах [1-5] показано, что учёт сил инерции позволяет исследовать колебательные процессы в зоне контакта. Настоящая работа посвящена изучению колебательных процессов в зоне точечного контакта при

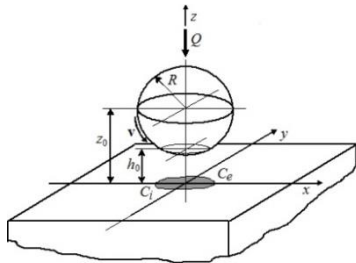


Рис. 1. Схема контакта

качении деформируемого шара массой  $m$  по упругому полупространству со смазкой в условиях ступенчатого изменения приложенной к шару нагрузки. Схема контактирующих тел показана на рис. 1. Принято: смазочный материал - несжимаемая вязкая ньютоновская жидкость в изотермических условиях; к шару приложена изменяющаяся во времени внешняя сила  $Q(t)$ , линейная скорость поверхности шара  $v(v_x, 0)$ . Физические свойства шара и вязкости смазочной плёнки полагаются известными. Задача (в безразмерном виде) сводится к системе нестационарных нелинейных интегродифференциальных уравнений и неравенств, описывающих распределения давления и толщины смазочной плёнки в зоне точечного УГД контакта с учётом сил инерции (второго закона Ньютона), с начальными и граничными условиями. Вычислительный алгоритм основан

на методе Ньютона и условиях дополненности для определения выходной границы, отделяющей зону смазки от кавитационной зоны.

Ступенчатое нагружение задавалось в виде  $Q(t) = 2\pi(1 + Ae(t-t_1))/3$ , где  $e$  - единичная функция,  $A$  - значение ступеньки нагрузки,  $t$  - время,  $t_1$  - момент скачка нагрузки. Расчеты проводились при разных значениях  $A$  и  $W$ ;  $W = \pi m v^2 / 12 P_0 R$  - параметр массы шара, где  $P_0$  - стационарная нагрузка,  $R$  - радиус шара. Получены в зоне УГД контакта распределения давления  $p(x, y, t)$  и толщины смазочной плёнки  $h(x, y, t)$ , местоположение выходной

границы смазочной плёнки  $x_e(y, t)$ , толщина смазочной плёнки в центре контакта  $H_0(t) = 2h_0(t)R/(a_H)^2$  ( $a_H$  - полуось герцевского контакта), сближение контактирующих тел  $\delta(t)$ . Рассчитаны распределения подповерхностных октаэдрических нормальных и касательных напряжений и их локальные экстремумы. Показано, что ступенчатое изменение нагрузки вызывает затухающие колебания характеристик контакта. На рис. 2 показано, что при  $A=0.5$  с ростом  $W$  возрастают амплитудные значения колебаний и период колебаний  $H_0(t)$  и  $\delta(t)$ . При  $t \rightarrow \infty$  для разных значений  $W$  устанавливается один и тот же стационарный режим со значениями  $H_0(t) < H_0(0)$  и  $\delta(t) > \delta(0)$ . С увеличением  $W$  время затухания колебаний растет. Влияние высоты ступеньки  $A$  в случае  $W=0.1$  показано на рис. 3. Зависимости  $H_0(t)$  и  $\delta(t)$  имеют вид затухающих колебаний, стремящихся к установлению соответствующего стационарного значения для каждого  $A$ : с ростом  $A$  при  $t \rightarrow \infty$  стационарные значения  $H_0(t)$  снижаются, а  $\delta(t)$  увеличиваются. С ростом  $A$  размах колебательных движений

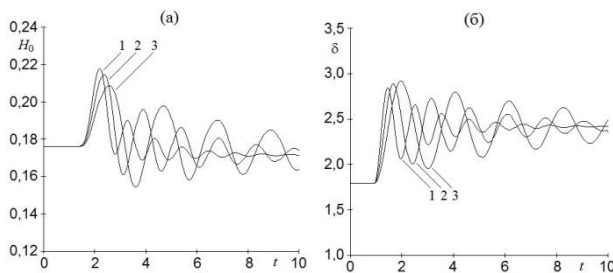


Рис. 2. Колебания при  $A=0.5$

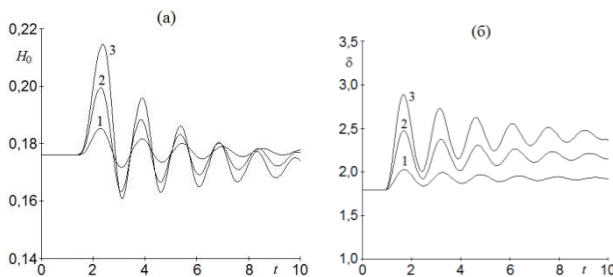


Рис. 3. Колебания при  $W=0.1$

увеличивается, а период колебаний остается неизменным. Показано, что после скачка нагрузки локальные экстремумы подповерхностных напряжений имеют вид затухающих колебаний около стационарного значения. С ростом  $W$  возрастают их амплитудные значения и период колебаний, увеличивается время затухания колебаний экстремумов. Расчеты продемонстрировали демпфирующее влияние смазочной пленки на колебания параметров УГД контакта.

[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. 765-776.

[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. P. 445-456.

[3] Kudish I.I. On formulation of a non-steady lubrication problem for a non-conformal contact // Tribol. Trans. 1999. V. 42. № 1. P. 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] Пановко М.Я. Влияние на параметры точечного упругогидродинамического контакта ступенчатого воздействия внешней нагрузки // Машиностроение и инженерное образование. 2023. № 1-2. С. 51-59.

# Вынужденные колебания цилиндрической оболочки в жидкости при возбуждении дискретными силами

Пузакина А.К.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Рассмотрена задача о вынужденных колебаниях оболочечной конструкции, погруженной в жидкость. Конструкция состоит из отсеков, каждый из которых представляет собой конечную упругую цилиндрическую оболочку с упругими кольцами на концах, к которым приложены вынуждающие силы. Задача актуальна, используется в задаче активного гашения. Система условно разбивается на подсистемы, включающие оболочки и кольца. Для каждой оболочки составляются дисперсионные уравнения и определяются их корни. Решение свободных колебаний оболочки записывается в виде вектора перемещений,  $(u, v, w, w)$ . Функция распределения перемещений оболочек по их длине записываются через перемещения торцевых сечений. Внутренние силы в оболочках тоже приводятся к торцам оболочек. Определяются матрицы динамических жесткостей колец по тем же четырем перемещениям. Вынуждающие силы распределены окружности по гармоническому закону  $P = p \cos n\varphi$ . Дискретные вынуждающие силы могут задаваться в любом месте по длине цилиндрической оболочки без применения  $\delta$ -функции. Получается матричное уравнение ленточного типа, состоящее из блок-матриц четвертого порядка. Используются уравнения движения цилиндрической оболочки в перемещениях, основанные на моментной теории упругих оболочек Кирхгофа - Лява. Решения уравнений свободных колебаний конечной цилиндрической оболочки записываются в форме [1]

$$u = U \cos(n\varphi) e^{i\omega t}, \quad v = V \sin(n\varphi) e^{i\omega t}, \quad w = W \cos(n\varphi) e^{i\omega t},$$

$$U = \sum_{j=1}^8 C_{jn} \frac{\Delta_{jn}^{(2)}}{\Delta_{jn}^{(1)}} e^{i\alpha_{jn}\xi}, \quad V = \sum_{j=1}^8 C_{jn} \frac{\Delta_{jn}^{(3)}}{\Delta_{jn}^{(1)}} e^{i\alpha_{jn}\xi}, \quad W = \sum_{j=1}^8 C_{jn} e^{i\alpha_{jn}\xi},$$

где  $n$  – окружные гармоники ряда Фурье,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $\alpha_{jn}$  – корни дисперсионного уравнения,  $j=1-8$  – порядковые номера корней,  $C_{jn}$  – искомые коэффициенты,  $\Delta_{jn}$  – миноры матрицы уравнения движения оболочки (3),  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота колебаний,  $f$  – частота колебаний. В решение (2) входят подлежащие определению корни дисперсионного уравнения  $\alpha_{jn}$  и коэффициенты  $C_{jn}$ . Для получения дисперсионного уравнения примем  $q_1 = q_2 = q_3 = 0$  и решение уравнения представим в упрощенном виде

$$v = V \cdot e^{i\alpha y} \sin n\varphi; \quad u = U \cdot e^{i\alpha y} \cos n\varphi; \quad w = W \cdot e^{i\alpha y} \cos n\varphi$$

В результате подстановки этих решений в уравнение движения получим уравнение свободных колебаний оболочки в матричном виде

$$\begin{bmatrix} L_{11} + \omega_*^2 & L_{12} & L_{13} \\ -L_{12} & L_{22} + \omega_*^2 & L_{23} \\ -L_{13} & L_{23} & L_{33} + \omega_*^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \end{Bmatrix} = \frac{a}{q} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_s \end{Bmatrix},$$

Дисперсионное уравнение для конечной цилиндрической оболочки, погруженной в жидкость, имеет вид

$$\frac{\Delta_0(\alpha)}{\Delta^1(\alpha)} - \frac{\rho_0 \omega^2 a H_n^{(2)}(ka)}{q k H_n^{(2)}(ka)} = 0,$$

Для составления уравнений вынужденных колебаний оболочечной конструкции внутренние силы в оболочках выражаются через перемещения их торцевых сечений. Матричное уравнение движения системы составляется из условия динамического равновесия колец под действием приложенных к ним сил.

$$M_k Z_k = P_k - F_k^{(1)} + F_k^{(2)},$$

где  $P_k$  – вектор возмущающих сил,  $F_k^{(1)}$ ,  $F_k^{(2)}$  – векторы внутренних сил, приложенные от оболочек к кольцу слева и справа,  $M_k$  – матрица динамических жесткостей кольца номера  $k$ . В уравнениях движения порядковые номера колец обозначим  $q$ , где  $0 \leq q \leq p$ . Уравнения составляются для каждого кольца в виде

$$H_q^3 G_q^*(\ell_q) C_q^1 H_{q-1}^2 Z_{q-1} +$$

$$+ \left[ M_q + H_q^3 G_q^*(\ell_q) C_q^2 H_q^1 - H_q^4 G_{q+1}^*(0) C_{q+1}^1 H_q^2 \right] Z_q - H_q^4 G_{q+1}^*(0) C_{q+1}^2 H_{q+1}^1 Z_{q+1} = P_q.$$

Общее матричное уравнение для оболочечной конструкции имеет ленточно-диагональную структуру расположения блок - матриц размером  $4 \times 4$  и в сумме может иметь порядок нескольких сотен. В результате решения этой системы определяются искомые векторы перемещений колец  $Z_q$ , АЧХ и формы колебаний.

[1] Косарев О.И., Пузакина А.К., Нахатакян Д. Ф. Вынужденные колебания цилиндрической оболочки, погруженной в жидкость. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. №5. С.36-44.

Научное издание  
Международная научная конференция  
«МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ  
СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ», посвященная  
85-летию Института машиноведения  
им. А.А. Благонравова РАН  
Сборник тезисов международной научной конференции  
под ред. акад. Ганиева Р.Ф.

Компьютерная верстка составителя  
Подписано в печать 17.11.2023. Формат 60×84/16. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 15,23. Тираж 50 экз. Заказ № 300.  
Отпечатано в типографии ИМАШ РАН.  
ул. Бардина, д. 4, Москва, 119334, Россия

ISBN 978-5-904282-18-9



9 785904 282189