

ФГБОУ ВО «ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ХАРДИКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПУТЕМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ
ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель - доктор технических наук,
доцент Агеев Е.В.

Курск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1 Общие сведения о стали ШХ15	11
1.2 Основные методы получения металлических порошковых материалов	13
1.2.1 Дробление и размол	14
1.2.2 Распыление и грануляция жидких металлов	21
1.2.3 Обработка металлов резанием	24
1.3 Существующие методы получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали	29
1.3.1 Способ получения порошкового материала из стружковых отходов шарикоподшипниковой стали	29
1.3.2 Способ получения стального порошкового материала и стружки из отходов металлообрабатывающих производств	32
1.3.3 Способ получения стального порошкового материала для производства спеченных изделий из шлифовального шлама ШХ15	36
1.3.4 Способ получения стального порошкового материала из отходов шлифования	37
1.3.5 Способ получения ультрадисперсного металлического порошкового материала	47
1.4 Выводы к главе 1	50
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ОТХОДОВ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ	51
2.1 Строение металлических материалов	51
2.2 Сущность процесса ЭЭД	67
2.3 Обзор существующего оборудования для получения порошковых материалов методом ЭЭД	79
2.4 Экспериментальная установка ЭЭД	89
2.5 Рабочие жидкости для получения порошковых материалов методом ЭЭД	98
2.6 Выводы к главе 2	101
ГЛАВА 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	102
3.1 Выбор материалов	102
3.2 Оборудование для получения порошковых материалов	105
3.3 Методика исследования гранулометрического состава	111
3.4 Методика исследований формы и морфологии поверхности частиц	114

3.5 Методика проведения рентгеноспектрального микроанализа частиц	116
3.6 Методика проведения рентгеноструктурного анализа порошков	119
3.7 Методика получения спеченных образцов	122
3.8 Методика исследования твердости образца	126
3.9 Методика исследования предела прочности при изгибе спеченного образца	128
3.10 Выводы к главе 3	130
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ	131
4.1 Постановка факторного эксперимента	131
4.2 Гранулометрический состав порошковых материалов	135
4.3 Исследование влияния электрических параметров установки ЭЭД на гранулометрический состав порошковых материалов	140
4.4 Форма и морфология частиц порошковых материалов	145
4.5 Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошковых материалов	150
4.6 Рентгеноструктурный (фазовый) состав порошковых материалов	152
4.7 Рентгеноспектральный микроанализ спеченных образцов	156
4.8 Исследование пористости спеченных образцов	163
4.9 Исследование микротвердости спеченных образцов	165
4.10 Исследование предела прочности при изгибе спеченного образца	169
4.11 Выводы к главе 4	170
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	172
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	174
Приложение А – Акт внедрения в производство	191
Приложение Б – Акт внедрения в учебный процесс	192
Приложение В – Патент	193

Введение

Одной из основных задач развития современного машиностроения является повышение качества, надежности и долговечности деталей, узлов и механизмов. Эта задача может быть решена за счет применения новых порошковых материалов, полученных на основе энерго- и ресурсосберегающих технологий.

К числу наиболее распространенных в машиностроении легированных сталей относится шарикоподшипниковая сталь, отходы и лом которой в больших количествах скапливаются на предприятиях.

Одним из наиболее перспективных и промышленно не применяемых методов получения порошковых материалов из токопроводящих отходов является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). Метод ЭЭД отличается малотоннажностью, возможностью регулировки дисперсности частиц порошкового материала, относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса. Помимо того, форма частиц порошкового материала, полученного по данной технологии, в основном сферическая, что благоприятно влияет на его текучесть и позволяет использовать его в различных областях, включая аддитивные технологии, плазменно-порошковую наплавку, металлизацию и т.д.

Для разработки технологии получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали и оценки эффективности их использования требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований. Проведение намеченных мероприятий позволит решить задачу получения порошковых материалов на основе железа, утилизации отходов шарикоподшипниковой стали и дальнейшее их использование и, тем самым, снизить себестоимость производства конечного

продукта.

Степень ее разработанности. Работы в области получения порошковых материалов электрической эрозией ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: Юго-Западный государственный университет; Московский политехнический университет; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева; Институт материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН; Ростовский государственный университет путей сообщения; Институт электродинамики НАН Украины и др.

Значительный вклад в теорию и технологию получения порошковых материалов электроэрозионным диспергированием внесли ведущие специалисты, такие как: Лазаренко Б.Р.; Лазаренко Н.И.; Лившиц А.Л., Намитокон К.К.; Палатник Н.С.; Агеев Е.В.; Латыпов Р.А.; Булычев В.В.; Серебровский В.И.; Бай-рамов Р.К.; Верхотуров А.Д.; Ершова Т.Б.; Щерба А.А.; Захарченко С.Н.; Фоминский Л.П.; Тарасов В.И.; Козярук О.И. и др.

В результате выполненных работ предложен ряд устройств и технологий, позволяющих получать порошковые материалы из токопроводящих отходов. Однако в трудах этих ученых не рассматриваются вопросы, касающиеся особенностей получения порошковых материалов электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковых сталей.

Изложенное выше подтверждает, что тема диссертационного исследования является актуальной и направлена на решение научно-практической задачи утилизации отходов шарикоподшипниковой стали с низкой себестоимостью, невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса, и имеющей важное народно-

хозяйственное значение.

Научная новизна

1. Установлены зависимости влияния электрических параметров (напряжения и ёмкости разрядных конденсаторов) на технологические свойства порошковых шарикоподшипниковых сталей, позволяющие варьировать гранулометрическим составом частиц порошкового материала.

Отмечено, что увеличение ёмкости разрядных конденсаторов и в большей степени напряжения на электродах при электроэрозионном диспергировании отходов шарикоподшипниковой стали способствует уменьшению среднего размера частиц порошковых материалов.

2. Установлены зависимости влияния свойств рабочей жидкости на свойства порошковых шарикоподшипниковых сталей, полученных электроэрозионным диспергированием, позволяющие варьировать элементным и фазовым составом частиц порошкового материала.

Экспериментально установлено, что диспергирование в дистиллированной воде способствует образованию в порошковом материале кислорода и фазы Fe_3O_4 , а диспергирование в осветительном керосине способствует образованию углерода и фазы Fe_3C .

3. Исследовано влияние состава, структуры и свойств порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали, на свойства полученных из них спеченных материалов.

Отмечено, что порошковые материалы, полученные методом электроэрозионного диспергирования из шарикоподшипниковой стали в среде керосина, не подвергаются спеканию.

Свойства спеченных образцов, полученных в кислородсодержащей жидкости (вода) следующие:

- пористость спеченного образца стали ШХ15 равна 1,72%, при этом 90% пор имеют размер до 1 мкм;
- твердость 154 HV;
- элементный состав спеченного образца и порошкового материала ШХ15 не имеют существенных различий;
- среднее значение предела прочности при изгибе составляет 550 МПа.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в исследовании, разработке и апробации технологии получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали в дистиллированной воде и керосине с низкой себестоимостью, невысокими энергетическими затратами путем применения экологически чистой технологии электроэрозионного диспергирования и их спекания.

Разработан и запатентован способ получения стальных порошков электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде (патент на изобретение № 2597443).

Реализация результатов работы

Результаты работы апробированы на промышленном предприятии ООО «Росутилизация 46».

Материалы исследований внедрены в учебный процесс при чтении лекций, выполнении лабораторных работ, курсовых и выпускных квалификационных работ со студентами и аспирантами в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Положения, выносимые на защиту

1. Способ получения стальных порошков электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде.
2. Теоретические, технологические и технические решения, позволяющие получать пригодные к промышленному применению

порошковые материалы микро- и нанодисперсий электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали.

3. Совокупность результатов экспериментальных исследований свойств порошковых материалов, полученных методом электроэрозионного диспергирования отходов шарикоподшипниковой стали и спеченных образцов из этих материалов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сопоставлением теоретических результатов с экспериментальными данными, в том числе с результатами исследований других авторов, а также успешной реализации разработанной технологии в производстве, применением отработанных методов и технических средств.

Личный вклад автора. Автором лично выполнен весь объем экспериментальных исследований, проведены необходимые расчеты, обработка результатов и их анализ, выбран комплекс методик для аттестации порошковых материалов, разработан способ получения порошковых материалов путем электроэрозионного диспергирования шарикоподшипниковой стали.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии» (Курск, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2014 г.); Международной научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Усть-Каменогорск, 2015 г.); «Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век - 2015» (Курск, 2015 г.); Международной научно-технической конференции

«Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования» (Воронеж, 2015г.); XII Международной научной конференции «Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов» (Курск, 2015 г.); 2-ой Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» (Курск, 2015 г.); VII Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2015)» (Курск, 2015 г.); 5-й Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» (Орел, 2016 г.); 3-й Международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2016 г.); VI-ой Международной научно-практической конференции «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (Курск, 2016 г.); VIII Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2016)» (Курск, 2016 г.); XIII Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Курск, 2016 г.).

Публикации. Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 29 работах, в том числе: 1 монографии, 9 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 публикацией в журналах, входящих в международную базу цитирования SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 193 страницы, в том числе 14 таблиц, 62 рисунка, 3 страницы приложений. Список литературы включает в себя 115 источников.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Общие сведения о стали ШХ15

Сталь ШХ15 применяется для производства бесшовных холодно- и горячедеформированных труб, предназначенных для изготовления колец шариковых и роликовых подшипников; шариков диаметром до 150 мм, роликов диаметром до 23 мм; втулок плунжеров, плунжеров; нагнетательных клапанов; корпусов распылителей; роликов толкателей и других деталей, от которых требуется высокая твердость, износостойкость и контактная прочность; круглой отожженной проволоки диаметром 1,4-10,0 мм для изготовления шариков, роликов и колец подшипников [1-3].

Заметная особенность такого сплава – высокий уровень сопротивления большим контактными нагрузкам. Износостойкость и твердость стали ШХ 15 обеспечивает повышенная концентрация углерода, хром – отвечает за увеличение глубины прокаливания металла. Главным недостатком всех подшипниковых сталей, включая материал марки ШХ 15, является пониженная обрабатываемость металла резанием.

Подобно любым другим углеродистым сплавам, эта сталь характеризуется повышенной чувствительностью к основным производственным технологическим аспектам: горячая деформация и термическая обработка позволяют повысить стойкость готового изделия из сплава ШХ 15 в несколько раз. Достаточно сказать, что такой материал может обладать твердостью в 61-63 HRC, сохраняя при этом должную износостойкость, вязкость, пластичность и высокую стойкость к смятию [3-5].

Обработка, выполненная по всем указанным в ГОСТе нормам, помогает достичь прочности в 0,2-0,3 Мдж/м², что несколько ниже, чем у углеродных высоколегированных сталей. При этом ударная вязкость материала остается сопоставимой, а пластичность – более высокой. Закалка сплава ШХ 15 производится при $t=810-820^{\circ}\text{C}$. Отпуск же выполняется при температуре 150-160^oC.

Эта углеродистая хромистая малолегированная сталь известна технологам уже порядка 100 лет, за время которых она показала себя превосходным материалом для широкого ассортимента режущего и измерительного инструмента. Повышенная износостойкость этого металла всегда привлекала зарубежных производителей ножей, в то время как российские производители для этих целей длительное время использовали марганцевые сплавы наподобие У8 или 65Г. С начала 2000-х эти материалы постепенно вытеснялись более универсальной и недорогой в производстве сталью ШХ 15 [6, 7].

Такие популярные аналоги, как ШХ 6 или ШХ 9, чаще всего идут на производство роликов и шариков подшипников. В свою очередь, кольца подобных изделий, толщина стенок которых доходит до 15-20 мм, рекомендуется изготавливать из стали ШХ15. Причина в том, что для неё характерна большая износостойкость и твердость.

1.2 Основные методы получения металлических порошковых материалов

Металлический порошковый материал — совокупность частичек сплава или других похожих на металл соединений, размеры которых колеблются от микрометров до миллиметров, пребывающих в двустороннем контакте и никак не соединенных между собой.

Производство порошкового материала – первая научно-техническая операция методики порошковой металлургии.

В практике общеизвестно огромное количество способов получения железных порошковых материалов, многообразие которых обуславливается научно-техническими способностями производства порошковых материалов несколькими методами из различного типа материала, а кроме того разными условиями к характеристикам порошков для различных отраслей и условий использования.

Проведя анализ литературных источников, методы получения металлических порошковых материалов можно разделить на два вида: механический и физико-химический [8–16].

Механические способы гарантируют превращение начального использованного материала в порошковый материал в отсутствии значимого изменения его хим состава.

Существует несколько способов механически получать порошковые материалы. К ним причисляют: дробление и размол; распыление расплавленного металла; грануляция; обработка металлов резанием.

1.2.1 Дробление и размол

Наиболее эффективным этот способ считается тогда, когда для получения порошкового материала используют отходы производства (обрезки, стружки) в качестве сырья. Таким способом получают порошковый материал любого металла. Но в практике он в основном применяется с целью превращения в порошковые материалы губчатых осадков металлов, которые получили электролизом либо восстановлением газами, а кроме того с целью дробления хрупких металлов и сплавов.

Методы машинного дробления используются, когда в качестве сырья для измельчения используют производственные отходы (стружка, обрезки, скрап). Но в некоторых случаях механизированный помол более применим, даже в случае если исходное сырьё не представляет собой отходы. К примеру, получение порошковых материалов из хрупких элементов (кремний, бериллий), порошковых бронзовых материалов или легированных сплавов заданного химического состава.

В основе дробления находится скалывающее, ударное и истирающее влияние так называемых мелющих тел, стен измельчающих приспособлений и наиболее размалываемой массы. При измельчении твердых тел протекают пластические и упругие деформации, во время которых накапливаются и зарождаются микротрещины, которые приводят к образованию новых поверхностей разделения и разламыванию тел. Размолу просто поддаются непластичные хрупкие материалы (различные тугоплавкие соединения, марганец, кремний). Существенно хуже поддаются размолу пластичные сплавы (цинк, медь), которые при размолу слипаются и сплющиваются.

Единая модель получения порошковых материалов механическим измельчением, как правило, проводится в следующей последовательности.

Сначала подготавливают шихту грубым дроблением. Затем получают стружку и приготавливают сечку (малые куски проволоки). После проводят измельчение шихты различного вида мельницами. После всех предыдущих операций проводят отжиг порошкового материала для того, чтобы снять наклёп.

Для грубого измельчения чаще всего используют молотковые, конусные, валковые, щековые дробилки, которые никак не отличаются от тех дробилок, которые применяют в горнорудной промышленности. После грубого дробления размер получаемых частиц составляет от одного до десяти миллиметров.

Окончательный размол и получение металлического порошкового материала проводится в вихревых, шаровых, планетарных, вибрационных мельницах.

Шаровая мельница является самым простейшим устройством, которое используется для получения мелкодисперсных порошковых материалов. Она представляет собой металлический барабан в виде цилиндра, внутри которого находятся размольные тела, чаще всего твердосплавные или стальные шары, и измельчаемый материал. При вращении барабана с разной скоростью допустимо разное перемещение шаров и, таким образом, несколько режимов дробления.

При незначительной быстроте вращения барабана совершается движение шаров по плоскости крутящегося барабана. В данном случае использованный материал стирается между наружной поверхностью массы шаров, которая ведёт себя равно как общее цельное, и стенкой барабана. Продуктивность размола при этом невелика. Такого рода порядок зачастую используется при смешивании неоднородных веществ.

При повышении количества оборотов барабана шары поднимаются на определенную высоту одновременно с вертящейся стенкой барабана, из-за шаров остенку, ипотомскатываются понаклонной плоскости массы шаров. Дробление использованного материала в данном случае совершается между поверхностями трущихся шаров. Интенсивность истирания использованного материала возрастает.

При еще большем количестве оборотов шары поднимаются на существенную высоту и спадают ниже, совершая дробящее действие, которое расширяет истирающее влияние на использованный материал. Данное состояние является наиболее активным режимом размола.

При последующем повышении кручения барабана сила увеличивается, и шары начнут вертеться совместно с барабаном. При этом использованный материал прекращает измельчаться. Подобная скорость вращения зовется критической ($V_{кр}$).

Рассмотренные ранее системы дробления имеют следующие характеристики, связанные с вращением барабана:

- режим скольжения при $0,2 V_{кр}$;
- режим перекатывания при $0,4 - 0,6 V_{кр}$;
- режим наиболее интенсивного измельчения при $0,75 - 0,8 V_{кр}$.

Указанные выше пропорции объективны при загрузке мельницы размалывающими телами в объеме $40 - 50\%$ от объема мельницы.

Соответствие между истирающим и дробящим воздействием шаров обуславливается взаимоотношением диаметра барабана (D) к его протяженности (L):

- при отношении $D/L = 3 - 5$ преобладает дробящее действие размольных тел;
- при отношении $D/L \leq 3$ – истирающее.

На процедуру дробления огромное воздействие оказывает общая масса раз-мольных тел. Наилучшим считается 1,7 – 2,0 килограмма размольных тел в 1 л. объёма барабана мельницы.

Объем загружаемого на помол использованного материала оказывает большое влияние на интенсивность дробления и должно быть таковым, для того чтобы заполнить объём промежутков среди размолочных тел. В случае, когда используемого материала становится больше, доля его, никак не вмещающаяся в зазоры, измельчается в меньшей степени, так как в данном случае она никак не подвергается истирающему воздействию размолочных тел. Помимо этого, снижается объём свободного места в барабане и усложняется беспрепятственное падение размолочных тел, что кроме того это уменьшает насыщенность дробления. Соотношение среди масс размолочных тел и измельчаемого используемого материала является 2,5 – 3.

Для того чтобы усилить течение размола, в особенности при измельчении непрочных веществ, его выполняют в жидкой среде, которая мешает распылению использованного материала и обратному склеиванию образующихся нетолстых круп. Помимо этого, проходя в микротрещины, раствор формирует огромное капиллярное давление, что содействует измельчению. Объем жидкости при размоле должен быть 0,4 л. на 1 килограмм размалываемого использованного материала. Длительность перемола составляет от нескольких часов до нескольких дней.

В порошковой металлургии в основной массе случаев применяются шаровые мельницы с периодической загрузкой и разгрузкой. Помимо всего прочего, могут применяться мельницы с центральной разгрузкой посредством полой цапфы, с торцевой разгрузкой сквозь диафрагму, представляющую из себя поперечную сетку, поставленную у выгрузочного конца барабана, либо с периферической разгрузкой посредством щели в

барабане и находящееся вокруг его трубчатое сито. В некоторых случаях используются шаровые мельницы, действующие по закрытому циклу вместе с классификатором, отделяющим недоизмельченный продукт уже после выхода с мельницы и отдающим его во вторичное дробление. В последнее время в порошковой металлургии всё больше начали применяться вибрационные мельницы, обеспечивающие ювелирное размельчение при малой трате энергии с помощью весьма нередких, но относительно слабеньких ударов по частичкам используемого материала. При этом появляются ударные, сжимающие и срезающие усилия неустойчивой величины, приводящие к усталостному разбитию крупы.

Дебалансная ось вибратора при кружении порождает кольцевые покачивания корпуса мельницы, загруженной на 75 – 90% размольными телами и измельчаемым веществом. Корпус мельницы базируется на пружины, амортизирующие воздействия инерциальных сил. Частота колебаний корпуса соответствует частоте оборотов вала, что является 1000 – 3000 об/мин. Размолочные тела и диспергируемое вещество, приобретая учащенные импульсы от стен корпуса, свершают непростое перемещение. Под влиянием соударений, вращений и скольжений размолочных тел вещество сильно измельчается. При работе мельницы совершается постоянное циркулирование размолочных тел и измельчаемого вещества. Вибрационные мельницы имеют все шансы функционировать время от времени и постоянно. Продуктивность размолы в них в несколько раз больше, нежели в шаровых вращающихся мельницах.

С целью деликатного дробления сложно растираемых веществ в сегодняшний день период обширно используют планетарные центробежные мельницы, в которых в качестве размолочных тел применяются шары. Ключевыми компонентами конструкции мельницы считаются основание,

кожух и корпус-шкив с обоймами. Корпус-шкив представляет собою сварную систему с центральной осью, около которой размещены 6 гнёзд для подшипников обойм и 3 для крепления осей промежуточных шестерен. На краях осей обойм размещены шестерни, совмещенные с переходными зубчатыми колёсами, и противовесы, обеспечивающие более однородное распределение нагрузки на подшипники. Вал корпуса-шкива вмонтирован в сидение на неподвижном стакане основного подшипника. На шпонке данного стакана укреплено недвижимая шестеренка. Оси переходных шестерен в корпусе-шкиве статично зафиксированы. Любая промежуточная шестеренка соединена с зубчатыми колёсами 2-ух располагающихся рядом обойм и передаёт им кручение с центрального недвижимого зубчатого колеса.

Размол вещества происходит таким образом. Начинается во вращение корпуса-шкива, обоймы вала и промежуточных шестерен. Зафиксированные в обоймах барабаны вращаются вокруг своей оси и так же заодно с корпусом-шкивом. Во время вращения масса размольных шаров находится рядом со стенкой барабана по сегменту. Форма и положение барабана не меняется во вращении. Так же, шары движутся по окружности, у которой ось барабана является центром. Таким образом, сложное перемещение шаров, которое сопровождается перекачиванием, приводит к интенсивному дроблению вещества за счет ударного воздействия сталкивающихся шаров и частиц материала и истирания. В сравнении с другими шаровыми мельницами, размол в центробежных планетарных мельницах осуществляется более интенсивно.

Вихревые мельницы используются для перетирания в порошок пластичных материалов. В них предложен процесс, основанный на принципе того, что сами частицы перетираемого вещества производят разрушающие

удары. При этом устраняются обыкновенные засорения веществом шаров и стен мельницы.

В состав мельницы входит рабочая камера, в которой размещены пропеллеры либо билы, крутящиеся в противоположащих направлениях при значительных, но непременно одинаковых скоростях. При этом формируются 2 обратно сориентированных воздушных либо газовых потока, которые увлекают вслед за собою крупницы порошкового материала. Крупницы измельчаются, сталкиваясь друг с другом. В бункер загружают размельчаемое вещество, откуда оно поступает в рабочую камеру, где размалывается. Так же в рабочую камеру еще подается насосом под напором воздух или же газ, которым размельченные крупницы удаляются в приемочную камеру. Быстрота воздушного потока регулируется с таковым расчетом, чтобы крупницы установленных габаритов удалялись из рабочей камеры. Большие крупницы садятся на дно в приемочной камере и возвращаются заново в рабочую камеру, где их повторно измельчают. Небольшие крупницы двигаются в отсадочную камеру, откуда выполняется разгрузка.

При этом ликвидируются простые загрязнения материалом шаров и стен мельницы. Вследствие вихревого дробления имеют все шансы получаться весьма изящные и пирофорные порошки. В целях предохранения порошкового материала от самовоспламенения в рабочую камеру впрыскивают инертный газ, к которому дополняют до 5% воздуха с целью создания на крупницах предохранительных оксидных пленок.

1.2.2 Распыление и грануляция жидких металлов

Грануляция и распыление жидких металлов считается преимущественно одним из самых производительных способов получения порошковых материалов. Рассеивание расплава представляется сравнительно обычным и недорогим научно-техническим процессом изготовления порошковых материалов из металлов с температурой плавления вплоть до 1600 °С.

Суть дробления расплавленного металла заключается в делении потока расплава газом либо водой при установленном давлении (рассеивание), или ударами лопаток крутящегося диска (центробежное рассеивание), или сливанием потока расплава в жидкую среду, к примеру воду (гранулирование).

Принципиально процедура разбрызгивания металлической струи потоком газа вероятно по многим схемам. Рассеивание возможно выполнять потоком газа, сконцентрированным под определенным углом к оси потока, обтекающим потоком газа, соосно обтекающим поток расплава, и газовым потоком, сконцентрированным к оси потока под прямым углом.

Максимально распространено рассеивание газовым потоком, при котором на независимо истекающий поток железного расплава ориентирован под углом 60 к ее оси кольцеобразный электрогазовый поток, формируемый соплами, обхватывающими поток сплава. В зоне схождения всех без исключения потоков газовой струи совершается разрушение потока расплава вследствие отрыва от неё единичных крупниц. Система разрушения потока сплава весьма сложная и целиком еще никак не исследована. На размер и форму возникающих крупниц оказывают большое влияние мощность и температура газовой струи, температура, диаметр потока, вязкость расплава

и неглубокое натяжение. Помимо этого, огромное воздействие проявляет конструкция форсуночного аппарата. К примеру, определено, что размер возникающих крупниц снижается с повышением быстроты истечения газа – энергоносителя из форсунки с расширяющимся соплом либо при увеличении давления дутья в форсуночных аппаратах с сужающимся соплом.

Более результативно рассеивание при температуре газовой струи, схожей с температурой расплава, так как неглубокое растяжение и вязкость при этом никак не испытывают перемен в ходе деления потока из-за отсутствия переохлаждения расплава. Но сформировать подобные требования при разбрызгивании расплавов, обладающих значительной температурой плавления (1500 – 1700°C), крайне сложно с-из-за трудностей, связанных с нагревом газового дутья и существенного усложнения и удорожания распылительных конструкций.

На размер крупниц, получаемого порошка, оказывает большое влияние и диаметр потока расплава. Повышение диаметр потока приводит к уменьшению количества маленьких крупниц в порошке, что сопряжено с возрастанием массы расплава, прибывающего в зону разбрызгивания в единицу времени. В практике, для материалов с температурой плавления вплоть до 1000 °C диаметр потока подбирают в границах 5 – 6 миллиметров, с температурой плавления вплоть до 1300 °C – 6 – 8 миллиметров и при наиболее высокой температуре плавления – 8 – 9 миллиметров.

При заполнении металлоприёмника расплавом, он обязан обладать температурой на 150 – 200 °C больше температуры его плавления, что гарантирует стабильное прекращение потока, в следствии чего уменьшается вывод малых фракций порошка. В сегодняшних аппаратах разбрызгивания металлоприёмники исполняются с подогревом, разрешая сохранять подходящую температуру потока расплава. Рассеивание потока расплава

водой широко используют в индустрии. Большая плотность воды гарантирует поддержку значительных скоростей носителя энергии на существенных расстояниях края сопла, нежели в случаях применения газовых струй. Это дает возможность в обширных границах менять обоюдное размещение потоков расплава и воды, упрощая проектирование аппаратов для разбрызгивания.

Помимо этого, при контакте водного потока с расплавом неминуема процедура активного парообразования около потока расплава так и около любой распылённой крупы. Согласно этой первопричине рассеивание потока расплава выполняется, по сути, не водой, а чрезмерно разогретым плотным паром, возникающим в области контакта плоскостей воды и расплава.

В аппаратах с центробежным разбрызгиванием поток сплава разбивается ударами лопаток крутящегося диска. Возникающий микропорошок совместно с водой, подаваемой под установленным давлением и по особой круговой трубке, формирующей из воды конфигурацию воронки, в недрах которой располагается поток жидкого сплава, поступает в приёмник. Воронкообразное оформление водяного участка конструкции дает возможность обезопасить поток жидкого сплава от досрочного уничтожения (грануляции) водой. Размер крупы порошка находится в зависимости от количества ударов лопаток о поток, удельной подачи сплава в камеру разбрызгивания и вязкости расплава.

Грануляция, как метод дробления металлов, уже давно используется с целью получения дробинки из свинца и других мягких металлов. Согласно этому методу расплавленную струю льют в резервуар с водой, обретаю жесткие порошки с величиной крупы 0,5 – 1,0 миллиметров и больше. Наиболее малые фракции возможно извлекать, если использовать активное

дробление потока расплава при поддержке перемещающейся конвейерной ленты с дальнейшим остыванием крупы сплава в воде.

В каждом из рассмотренных альтернатив разбрызгивания микропорошок включает, как правило, кислород в облике оксидов. По этой причине порошки, полученные разбрызгиванием, подвергаются реставрационному отжигу, целью которого считается не только возобновление оксидов, но усовершенствование научно-технических качеств порошка (прессуемость, спекаемость и т.д.).

В сегодняшнее время всё обширнее применяются способы неконтактного разбрызгивания с применением сильных импульсов тока, когда посредством твердых (в варианте проволоки) или водянистых проводников (распыляемая основа) пропускается сильный импульс тока, и проводник моментально разогревается и распыляется, или влиянием электромагнитных полей, когда при пропускании электротока по потоку расплава рассеивание исполняется в варианте взрыва проволок.

1.2.3 Обработка металлов резанием

Изготовление порошковых материалов обработкой металлов резанием в практике применяются весьма изредка. Порошки получают при станочном обрабатывании малогабаритных металлов, выбирая такой порядок резания, который гарантирует формирование крупы, а никак не сливной стружки.

При данном возникающие остатки в облике большой стружки рационально применять с целью последующего дробления в шаровых, вихревых и иных агрегатах, а небольшую стружку и опилки с размером крупы порошка приблизительно 1 миллиметр возможно применять для производства изделий без вспомогательного деления. В отдельных вариантах

использование данного способа для извлечения порошка считается практически единственным. В первую очередь всего, это принадлежит к тем сплавам, которые весьма активны по отношению к кислороду, в особенности в пребывании большой дисперсности. К примеру, по данному методу получают магниевый порошковый материал.

К физико-химическим способам причисляют научно-технические процессы изготовления порошковых материалов, при которых из-за глубочайших физико-химических превращений сплав либо соединение переходит в порошкообразное состояние. В результате приобретаемый порошковый материал по химическому составу и структуре способен различаться от начального используемого материала.

К главным физико-химическим методам относят:

1. Метод высокоскоростного затвердевания расплава (ВЗР).

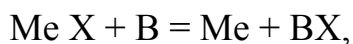
Размер крупниц, возможно, корректировать в обширных границах: с десятков микрометров вплоть до нескольких мм. Способ обладает большой производительностью, экономичностью и экологической чистотой. Данным способом, возможно, приобрести аморфные порошковые материалы.

Наравне с описанными выше, имеются и прочие способы разбрызгивания порошковых материалов: виброраспыление проволоки с через дуговое расплавление, «подрыв» проволоки в инертной обстановке, ультразвуковое рассеивание расплава, рассеивание расплава пропусканием узкого потока среди двух вращающихся валков, рассеивание крутящегося электрода в магнитном область, и т.д., однако они ещё никак не нашли обширного распространения.

2. Восстановление металлов. Возобновлением разных соединений имеют все шансы быть получены почти все без исключения сплавы. Максимальное продвижение приобрело восстановление галогенидов,

оксидов и иных соединений при применении в качестве восстановителей углерода, водорода либо металлов.

Реакцию восстановления возможно показать в общем виде уравнением:



где Me – восстанавливаемый металл;

MeX – исходное соединение металла;

B – восстановитель.

Восстановление из оксидов металлов – более популярный производственный способ извлечения порошковых материалов низколегированных сталей и железа.

Помимо железа, восстановлением получают определенные цветные тугоплавкие сплавы (вольфрам, молибден) при температурах, которые существенно ниже температуры плавления (вольфрам восстанавливают при температуре 1000 – 1200° С, а температура его плавления 3380° С). В качестве восстановителя для порошков вольфрама и молибдена применяется водород либо углерод.

а) металлотермическое восстановление. Данный способ основывается на большем родстве металла-восстановителя к хлору, кислороду, фтору или другому неметаллическому элементу соединения MeX, чем восстанавливаемый металл. Для получения порошковых материалов ряда редких металлов (титана, циркония, тантала, ниобия, урана, бериллия и др., а также легких металлов - рубидия, цезия, магния, бария и др.) этот метод получил распространение.

б) автоклавное восстановление – это процесс восстановления сплавов водородом в водных растворах солей. Отличные технологические характеристики и высокую чистоту имеют автоклавные медные порошковые материалы.

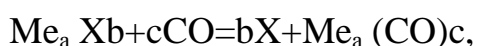
3. Метод диффузионного насыщения из точечных источников используется в производстве сплавов и легированных сталей. Суть технологии заключается в том, что проводят процесс смешивания соответствующих частей окислов металлов с 2-х или 5-ти %-ным йодистым аммонием или хлористым. Адсорбционно – диффузионный механизм технологии дает возможность получать однородные порошковые материалы марганцовистых, кремнистых, хромомолибденовых, хромистых и нескольких специальных сталей.

4. Производство металлических порошковых материалов электролизом. Для производства порошков кадмия, свинца, тория, серебра, меди, титана, цинка, железа, никеля, олова, сурьмы, циркония, тантала и др. используют электролиз йодных растворов и расплавленных сред. Одним из преимуществ электролитических порошковых материалов является высокая чистота и хорошие технологические характеристики (спекаемость и прессуемость). Способ допускает вероятность применения загрязнения начальных веществ.

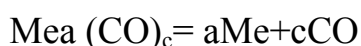
Для производства порошка титана, тантала и циркония используется электролиз расплавленных сред.

5. Карбонильный метод получения порошков. Карбонилами называют соединения с окиси углерода $Me(CO)$ с металлами, которые обладают маленькой температурой образования и разложения. По данному методу процесс получения порошковых материалов состоит из двух главных этапов:

- получение карбонила из исходного соединения



- термическая диссоциация карбонила и образование металлического порошкового материала.



Распад карбониллов часто применяется при получении порошковых материалов железа и никеля. Суть данного процесса заключается в образовании карбонила соответствующего металла $\text{Me}(\text{CO})_4$ или $\text{Me}(\text{CO})_5$ и последующей его термической диссоциации при температурах 200–500° С., Хорошей формуемостью и высокой дисперсностью обладает порошковый материал, который получают при разложении карбониллов.

Карбонильные порошковые материалы различаются особенной формой крупиц и структурой, называемой «луковой кожурой».

Карбонильным методом в промышленном масштабе получают порошковые материалы кобальта, железа, никеля, металлов Отметим так же, что большая часть карбониллов являются токсичными (ядовитыми) и возникает необходимость проводить процесс с соблюдением всех соответствующих правил безопасности.

6. Получение порошков цементацией. Способ цементации менее благородными металлами. Так же этот процесс ещё называют контактным восстановлением металлов из растворов. На сегодняшний день этот способ не находит широкого применения.

7. Метод межкристаллитной коррозии. Этот способ основывается на растворении в сплавах специальными растворами межкристаллитных прослоек. Метод межкристаллитной коррозии используют для труднополучаемых сплавов, которые невозможно получить в виде порошкового материала другими способами.

В частности, способ межкристаллитной коррозии применяют с целью извлечения порошковых материалов хромоникелевых и нержавеющей сталей. Способ никак не нашел широкого промышленного использования.

8. Метод конденсации металлов. Испарением и последующей конденсацией можно получать порошковые материалы из металлов, которые

отличаются большой летучестью паров при сравнительно небольших температурах. Метод конденсации позволяет получать порошковые материалы магния, цинка, кадмия.

1.3 Существующие методы получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали

1.3.1 Способ получения порошкового материала из стружковых отходов шарикоподшипниковой стали

Предварительно размолотую стружку шарикоподшипниковой стали до частиц менее 50 мм нагревают до температуры аустенизации 820 – 920 С и выдерживают в течение 20-85 мин, что обеспечивает растворение в аустените 70-96 карбидов. Затем производят охлаждение стружки сначала до температуры верхнего бейнитного превращения со скоростью больше критической, затем до комнатной температуры со скоростью менее 5 град/с. Способ включает предварительный размол стружки до размеров менее 50 мм, нагрев и выдержку стружки при температуре аустенизации 820-920 С в течение 20...85 мин до растворения в аустените 70-96% карбидов от их исходного содержания в стали. После этого производят охлаждение стружки: сначала до температуры верхнего бейнитного превращения со скоростью, большей критической, а затем до комнатной температуры со скоростью менее 5 С/с. Причем нагрев, выдержку и охлаждение осуществляют в защитной атмосфере, Охлажденную до комнатной температуры стружку подвергают вторичному размолу и отжигу. 1табл. выдержку и охлаждение осуществляют в защитной атмосфере, Охлажденную до комнатной температуры стружку подвергают повторному размолу и отжигу [17].

Время выдержки стальной стружки при температуре аустенизации (менее 20 мин), необходимое для растворения карбидов менее 70 от их общего содержания в стали, недостаточно, так как количество карбидов, выделяющихся в этом случае при дальнейшем охлаждении по границам бейнитных зерен, мало для полной локализации всех кристаллов бейнита грубыми карбидными веществами, что приводит при размоле к невозможности разделения зерен бейнита друг от друга, к получению крупного порошка округлой формы и, как следствие, снижению его формуемости и уплотняемости.

Наиболее благоприятных результатов можно достичь при растворении 70-96% карбидной фазы при аустенизации, так как при этом получают дисперсный порошок с осколочной формой частиц. Увеличение времени выдержки при аустенизации больше, чем необходимо для растворения 96% карбидов в γ -Fe (более 85 мин), нецелесообразно, так как в получаемом стальном порошке формуемость и уплотняемость более не улучшаются.

При охлаждении стружки от температуры верхнего бейнитного превращения до комнатной температуры по границам бейнитных кристаллов выпадают карбиды в виде грубых выделений цементита, которые значительно повышают дефектность структуры, т. е. ее хрупкость. При этом, как показали эксперименты, если скорость охлаждения выше 5 град/с, выпадающих по границам бейнитных кристаллов грубых выделений карбидов недостаточно для значительного охрупчивания металла, что ведет (из-за плохой размалываемости) к получению крупных, наклепанных частиц, что, в свою очередь, влечет за собой очередь, влечет за собой ухудшение как формуемости, так и уплотняемости, а значит прессуемости. Охлаждение стружки от температуры верхнего бейнитного превращения до комнатной температуры со скоростью меньше 0,1 град/с технологически

нецелесообразно, так как возрастает время всего процесса, а технологические свойства остаются на том же уровне.

Частицы стружки стали ШХ15СГ размером менее 50 мм помещают в герметично закрывающийся контейнер с водоохлаждаемой крышкой и нагревают в атмосфере аргона в электропечи до 820 С.

Нагретую стружку выдерживают при этой температуре 1 ч. За это время в аустените растворилось 70 карбидов от их общего содержания в стали. Количество это определяли так; изготавливали шлиф исходной структуры стали ШХ15СГ, представляющей собой зернистый перлит, производили травление известным травителем на цементит, не выявляющим общую структуру стали, содержащим 2 г пикриновой кислоты, 25 г едкого натра, 75 мл воды, продолжительность травления в кипящем растворе 10 мин, Затем на металлографическом комплексе "Buehler" "Versamet" подсчитывали количество карбидов в исходной структуре при увеличении в 1000 крат, которое принимали за 10 .

После аустенизации при 820 С в течение 0 5 ч производили закалку этого же образца в воду и изготавливали из него шлиф, На металлографическом комплексе повторно определяли количество видимых карбидов в закаленной структуре при увеличении в 1000 крат после травления по указанному режиму. Количество видимых карбидов в мартенсите составило 50 от их содержания в исходной структуре. Растворенные в аустените карбиды после закалки остаются в составе пересыщенного твердого раствора углерода в γ -Fe и не выявляются при травлении, а нерастворившиеся карбиды в α -Fe выявляются в структуре мартенсита.

Следовательно, количество растворившихся в аустените карбидов определяется по разнице между количеством карбидов в исходной структуре

зернистого перлита и количеством карбидов в мартенсите. Исходя из этого, при режиме аустенизации: 820 С и выдержке 0,5 ч в у в Б” Fe растворилось $10050=507$ карбидов от исходного содержания в стали, После аустенизации при 820 С в течение 1 ч в аустените растворилось 70% карбидов, подсчитанных по изложенной методике.

Для растворения в аустените стали ШХ15СГ 70 карбидов от их исходного содержания в стали при 820 С выдержку необходимо проводить в течение 1 ч. Затем стружку охлаждали до температуры верхнего бейнитного превращения 500 С со скоростью 10 град/с путем помещения контейнера в медный водоохлаждаемый кожух. Охлаждение от 500 С до комнатной температуры вели со скоростью 5 град/с в атмосфере аргона. После охлаждения частицы стружки подвергали вторичному размолу в МБЛ-1. Полученный порошок подвергали отжигу в неокислительной атмосфере для снятия внутренних напряжений при 750 С в течение 10 мин.

1.3.2 Способ получения стального порошкового материала и стружки из отходов металлообрабатывающих производств

Отходы промышленного металлообрабатывающего (например, подшипникового) производства можно классифицировать на два основных вида: 1 стружечные отходы; 2 шламовые отходы стали.

Во всех видах отходов присутствует жидкая фаза смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ).

При обработке металлов резанием, например при изготовлении деталей подшипников, как правило, используют смеси минеральных масел средней вязкости (ИС-12; МЛ-1; МЛ-24). Поэтому стружечные отходы это стружка, "пропитанная" маслом.

При шлифовании используемая СОЖ представляет собой минеральные масла низкой вязкости 4-30 мм²/с. При металлообработке могут быть использованы в качестве СОЖ масла с добавками водных раствором различных эмульгаторов. Поэтому шламовые отходы это густая пастообразная смесь порошка, масел и остатков водных растворов.

Получение стружки и, особенно, порошков из отходов осложняется наличием нерастворимых в воде компонентов СОЖ: масел, стеарина, жирных кислот. Таким образом, основной проблемой очистки отходов металлообработки является удаление нерастворимых в воде жирных компонентов СОЖ масел.

Для решения поставленной задачи предложен способ получения стального порошка и стружки из отходов металлообрабатывающих производств и установка с целью его реализации. Сущность изобретения в следующем. Из отходов металлообрабатывающих производств (стружки и шлама) предварительно механически удаляют избыток влаги и проводят их термообработку в вакууме при 280-400°С и давлении не более 1,0 мм рт.ст. Использование вакуума при термообработке стружечных или шламовых отходов обусловлено как неустойчивостью (окисляемостью) масел на воздухе при нагреве выше 140°С, приводящее к образованию коксообразных продуктов, так и способностью порошка и стружки активно реагировать с кислородом при нагреве на воздухе. Снижение температуры термообработки приводит к неполному отделению масла, подъем выше верхнего предела способствует коксообразованию (окислению масла), что снижает эффект очистки. При увеличении давления выше указанного не достигается полной очистки отходов от масла.

На фиг.1 представлена схема установки для осуществления способа; на фиг. 2, 3 варианты выполнения установки.

Установка для получения стального порошка и стружки из отходов подшипникового производства содержит камеру 1 с нагревателем 2, емкость 3 с перфорацией, конденсатор 4, маслосборники 5 и 6.

Установка может быть снабжена загрузочным и разгрузочным устройствами 7 и 8, средством для перемещения отходов 9. Кроме того, нагреватель может быть размещен как снаружи емкости 3, так и внутри нее (ТЭН) (см.фиг.2). Емкость для отходов может быть выполнена с донной перфорацией или полностью перфорированной и может быть выполнена с перегородками (см.фиг.3).

Установка работает следующим образом. В емкость 3 для отходов посредством загрузочного устройства 7 загружают маслосодержащие отходы металлообрабатывающих производств. Герметизируют всю установку, включают водяное охлаждение конденсатора 4, верхней и нижней обечаек установки. Затем через конденсатор 4 подключают установку к вакуумной системе. По достижении заданного значения вакуума включают нагрев посредством внешнего 2 или внутреннего 10 нагревателей. При необходимости включают перемешивающее устройство 9. В процессе нагрева отходов в динамическом вакууме часть содержащихся в них масел стекает в сборник 5, другая часть в виде паров конденсируется на поверхности экрана 11 и в конденсаторе 4. Сконденсировавшееся на поверхности экрана масло по трубопроводу попадает в конденсатор 4, а из конденсатора в сборник 6. По мере заполнения сборников маслом 5 и 6 их разобщают с вакуумной системой и сливают накопившееся масло.

Очищенные от масла стальной порошок или стружку выгружают разгрузочным устройством 8 в контейнер Б. Заполненный контейнер разобщают с вакуумной системой и освобождают от очищенных стального порошка или стружки.

Результаты использования предлагаемого способа получения стального порошка и стружки из маслосодержащих отходов металлообрабатывающего производства, а также результаты работы установки для осуществления способа представлены в табл.1-4.

В качестве отходов использовали стружечные и шламовые отходы стали ШХ-15 подшипникового завода ГПЗ-20.

Термовакuumную обработку проводили в предлагаемых условиях, то есть при давлении менее 1,0 мм рт.ст. и температуре не более 400°С.

Кроме того, термовакuumную обработку проводили при давлении выше предлагаемого и температуре выше и ниже предлагаемой.

Как видно из табл.1 и 2, стружка и стальной порошок, полученные в предлагаемых условиях, практически полностью очищены от масла, а их химический состав по ряду элементов соответствует стандартному составу стали ШХ-15. Масло, полученное из стружечных и шламовых отходов (см.табл.3), пригодно для повторного использования. Полученные из отходов стальной порошок и стружка без дополнительной очистки могут использоваться в качестве легирующих добавок, в порошковой металлургии и других областях техники. Порошок при необходимости подвергается магнитной сепарации без дополнительной очистки.

В табл.4 представлены данные по осуществлению способа в установке предлагаемой конструкции, из которой видно, что предлагаемая конструкция позволяет осуществить практически полное удаление масла из отходов и получить масло, пригодное для повторного использования.

1.3.3 Способ получения стального порошкового материала для производства спеченных изделий из шлифовального шлама ШХ15

Для достижения технического результата в способе получения стального порошка из шлифовального шлама ШХ15, включающем отмывку, сушку, размол, рассев и магнитовибрационную сепарацию, перед размолом проводят рассев на сите 0,05 мм [19].

Предлагаемое изобретение стало возможным после того как авторы установили механизм взаимодействия между абразивным зерном шлифовального инструмента и обрабатываемым материалом. Абразивное зерно, подобно резцу, снимает микростружку.

Микростружка зависит от размера абразивного зерна. Режущая грань крупного зерна снимает «витую» стружку до тех пор, пока не разрушится режущая кромка. Витая стружка наматывается в клубок (агрегат).

Меленькое абразивное зерно снимает «ломаную» стружку, а затем само выкрашивается из инструмента.

Этот механизм взаимодействия приводит к тому, что шлифовальный шлам состоит из смеси стальной микростружки двух типов, выкрошенных частиц абразива и органической связки.

Гранулометрический состав отмытого от СОЖ и высушенного шлифовального шлама приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Гранулометрический состав отмытого от СОЖ и высушенного шлифовального шлама

Фракция, мм	+0,16	-0,16+0,1	-0,1+0,063	-0,063+0,05	-0,05
Сод. масс %	4,5	8,9	11,1	15,4	60,1

Фракция - -0,05 мм - это отдельные частицы стали ШХ15, «ломаная» стружка, с минимальным содержанием зерен абразива и органической связки.

Фракция - 0,05 мм содержит единичные зерна абразива и не нуждается в магнитной сепарации, т.к. они не влияют на свойство спеченного изделия. На фигуре 6 изображение поверхности полированного образца, после первого спекания, с единичным включением Al_2O_3 , сделанное на растровом электронном микроскопе при увеличении 10 000.

1.3.4 Способ получения стального порошкового материала из отходов шлифования

Сущность способа заключается в том, что отходы шлифования стали ШХ - 15 предварительно промывают водой, 1% -ным раствором серной кислоты и водой; промывку ведут в плотном, предварительно утрамбованном слое отходов в бочке с перфорированным днищем при фильтрации жидкости через слой отходов под действием силы тяжести. Обезвоживание отходов проводят до влажности 20 - 25% по весу. Отходы выгружают на виброгрохот с ячейками размером 4 мм, диспергируют при просеве, загружают на сетчатые поддоны высотой 50 мм и помещают в вакуум-фильтр с вентилятором и электрокалорифером для подогрева воздуха. В зависимости от исходного содержания масла в отходах концентрацию серной кислоты в водном растворе изменяют[20].

Изобретение относится к порошковой металлургии, в частности к способам получения стального порошка из отходов шлифования.

Известен способ переработки отходов шлифования, содержащих воду и масло, заключающийся в том, что отходы предварительно отстаивают в воде в течение нескольких суток, промывают, обезвоживают до влажности 4-20% и подвергают рыхлым слоем отстою на воздухе [1].

Недостатками этого способа являются длительность процесса отстоя, необходимость в значительных площадях под отстой отходов в воде, досушки материала с остаточной влажностью около 4%.

Цель изобретения - повышение производительности процесса.

Цель достигается тем, что в способе получения стального порошка из отходов шлифования, включающем промывку отходов в воде, обезвоживание, размещение их на сетчатом поддоне рыхлым слоем и выдержку в воздушной атмосфере, перед промывкой водой отходы промывают водным раствором серной кислоты, обезвоживание проводят до влажности 20-25% с последующим диспергированием, а при выдержке в воздушной атмосфере осуществляют фильтрационную сушку путем пропускания через рыхлый слой теплоносителя.

Кроме того, при размещении на сетчатом поддоне в слой отходов, обладающих повышенной сыпучестью, вводят известняк.

Кроме того, в качестве теплоносителя используют газообразные продукты восстановительного отжига металлоотходов.

В последнем случае повышается эффективность способа за счет утилизации бросового тепла с одновременной очисткой газа и насыщением отходов сажей, необходимой для довосстановления содержащихся в них металла в ходе того же отжига.

После обработки по предложенному способу дальнейшая переработка отходов может иметь несколько вариантов. По первому из них отходы дробят, просеивают, сепарируют, отжигают, размалывают и рассеивают. Этот вариант применим при содержании абразива в отходах свыше 30-50%.

По второму из вариантов отходы дробят, чем достигают их большей плотности при отжиге, т.е. более высокой производительности. Во время отжига сера удаляется за счет взаимодействия с известняком, а

довосстановление металла идет за счет сажи, уловленной фильтрующим слоем при пропускании через него дымовых газов, образующихся в ходе этого отжига. Одновременно отходы спекаются. Спеки либо переплавляют с распылением расплава в порошок, либо размалывают, просеивают и сепарируют. Этот вариант применим для отходов, содержащих масло с серой, не более 10-20% абразива, а также для отходов с высоким содержанием кислорода в металле. Сушка с низкотемпературным разложением масла и частичной его полимеризацией дает возможность за счет более эффективного дробления отходов получать при отжиге достаточно плотные спеки, плотностью, превосходящей в несколько раз плотность спеков из отходов, подвергнутых сушке и дроблению, минуя процесс низкотемпературного разложения масла. Более высокая плотность спеков требуется для их эффективного переплава.

Обработке подвергались отходы шлифования стали марки ШХ 15 с Минского ГПЗ-11. Предварительно отходы промывались водой и 1%-ным водным раствором серной кислоты и водой. Воды для промывки требовалось 30 л на 80 кг отходов. Промывку вели в плотном, предварительно утрамбованном слое отходов в бочке с перфорированным днищем в режиме идеального замещения путем фильтрации жидкости через слой отходов под действием силы тяжести. В ходе промывки отходы не изменяли свой объем, после промывки они содержали то же количество жидкости, что и до промывки, - 20-25% по весу. Затем отходы выгружались на виброгрохот с ячейками размером 4 мм, диспергировались при просеве, загружались на сетчатые поддоны высотой 50 мм и помещались в установку типа вакуум-фильтр с вентилятором мощностью 5,5 кВт и электрокалорифером для подогрева воздуха мощностью 6,5 кВт. Единообразно в сушилке находились три поддона с загрузкой от 7,5 до 12 кг отходов каждый.

Начиная с 30% воды и выше, отходы представляли собой пастообразный материал.

При содержании воды 20-25% они напоминают войлок и просеиваются через сито с ячейками размером не менее 2,5 мм.

При содержании воды 10-15% сыпучесть отходов возрастает, и они просеиваются через сито с ячейками с размерами не менее 1,6 мм.

При содержании воды 7-8% отходы просеиваются через сито с ячейками размерами не менее 1 мм.

При содержании воды свыше 30% отходы пропускают через сита, не забивая их, только при размерах ячеек не менее 4-6 мм.

В ходе сушки сетки с ячейками размером 0,3 мм частично забивались при влажности 20-25% и полностью - при влажности 30% и более. Сетки с ячейками размером 1 мм наглухо забивались отходами при влажности свыше 30%.

В процессе сушки диспергированных отходов влажностью свыше 30% по мере удаления (выжимания) влаги они уплотнялись, объем их уменьшался в 1,5-2 раза.

В процессе сушки диспергированных отходов влажностью 20-25% объем их не изменялся вплоть до окончания сушки.

В процессе сушки диспергированных отходов влажностью менее 15% их объем уменьшается в ходе сушки приблизительно в 1,3-1,5 раза из-за возрастания их сыпучести по мере сушки.

В ходе сушки отходов, не промытых раствором серной кислоты, на сетках с ячейками 1 мм при исходной влажности 20-25% наблюдался унос (в виде пыли) до 5% отходов от их веса, на сетках с ячейками 0,3 мм - до 1-2%.

Содержание масла в высушенных отходах определялось следующим образом. Их навеску помещали в вакуум-печь и при температуре 200-300°C

испаряли находящееся в отходах масло. Затем отходы вновь взвешивались и по разнице массы определялся процент масла в них.

Оптимальную концентрацию серной кислоты в ее водном растворе определяли таким образом. Параллельно исходные отходы подвергались воздействию 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5%-ными растворами серной кислоты с целью определения минимального процента, при котором из них начинает выделяться водород. При этом в зависимости от исходного содержания масла в отходах оптимальная концентрация кислоты изменялась: при содержании масла 1% - 0,25%-ный раствор серной кислоты; 2% - 0,5%-ный раствор; 4% - 1%-ный раствор; 8-9% - 5%-ный раствор кислоты.

Содержание воды в исходных отходах составило 40-50%, но после отстоя и утрамбовки находилось в пределах 20-25%.

С учетом этих особенностей сушки отходов стоит задача: 1 - удалить или полимеризовать масло (превратив его в твердое вещество) в ходе сушки; 2 - уменьшить унос пыли в ходе сушки. Попутно решается задача, раз уж создается фильтрующий слой, очистки дымовых газов в ходе отжига и спекания стальных порошков с утилизацией тепла и улавливанием сажи, пропуская их вентилятором через этот слой.

Отходы шлифования Минского ГПЗ-11 содержали 3% масла. Часть их промывалась только водой, другая часть их промывалась последовательно 1%-ным водным раствором серной кислоты и водой. Результаты фильтрационной сушки приведены в табл. 1.

Со знаком х - отходы, подвергнутые промывке 1%-ным водным раствором серной кислоты (125 мл на 1 кг отходов) и затем водой (375 мл на 1 кг отходов). Масса высушенных отходов 6 кг.

Было определено, что для инициирования процесса разложения масла, сопровождающегося повышением температуры отходов, катализатором

которого является железо, необходима такая концентрация H_2SO_4 , при которой начинает выделяться водород, т.е. удаляется окисная пленка на частицах металла.

При 8-9% масла концентрация кислоты 5%, максимальная температура отходов $74^{\circ}C$ при отстое в течение 4 ч.

При 4% масла эта концентрация кислоты 1%, максимальная температура отходов $82^{\circ}C$ при отстое в течение 2 ч.

При 2,5-3% масла - 0,5% H_2SO_4 , $t_{max} = 82^{\circ}C$ при отстое в течение 2 ч.

При 2,5-3% масла и промывке 1%-ным раствором H_2SO_4 $t_{max} = 90^{\circ}C$ при отстое в течение 2 ч.

В ходе низкотемпературного разложения масла после предварительной фильтрационной сушки происходило изменение содержание воды и масла.

Исходное содержание воды 10,4% и 9% масла.

Конечное содержание воды 6% и 8,3% масла. Промывка 5% H_2SO_4 .

Исходное содержание воды 11% и 2,4% масла.

Конечное соответственно 2,4% и 1,3%, 0,5% H_2SO_4 .

Исходное содержание воды 13,1% и 2,5% масла.

Конечное 5% и 1,1%. 1% H_2SO_4 .

Исходное содержание воды 12,6% и 3,9% масла.

Конечное 6,7% и 1,9%. 1% H_2SO_4 .

При исходной влажности 16%, исходное содержание масла 2,6%, 0,5% H_2SO_4 убыль массы отходов достигала 14% за 15 ч отстоя, плотность после утряски высушенных отходов $2,7 \text{ г/см}^3$.

Той же самой плотности после утряски можно достичь для этих же отходов после промывки их 0,5%-ным раствором H_2SO_4 и водой, фильтрационной сушки в течение 10 мин и 1-часового отстоя с подъемом температуры до $90^{\circ}C$.

После промывки водой и сушки отходов эта плотность достигала 1,8 г/см³.

После промывки 1% -ным раствором кислоты и водой время фильтрационной сушки можно сократить, прекращая сушку при влажности 5-6%. Например, при исходной влажности отходов 25% это время в два раза меньше, чем при полной сушке предварительно не промытых раствором кислоты отходов. Это прекращение сушки нужно делать, особенно при содержании масла в отходах 4-5%, чтобы обеспечить необходимую влажность для завершения низкотемпературного разложения масла за время отстоя примерно в течение одного часа, когда температура отходов возрастает до 90°C. В этом случае содержание органики в отходах уменьшается примерно в два раза, а остатки масла полимеризуются. При полной фильтрационной сушке этих отходов (без ее прерывания) преобладающим является процесс полимеризации масла.

Согласно табл. 1 видно, что возрастание скорости сушки достигается при исходной влажности диспергированных отходов в пределах 20-25%, причем максимальная интенсивность сушки достигнута при сушке отходов, промытых водным раствором кислоты и водой.

Сушке подвергались отходы шлифования быстрорежущей стали Минского инструментального завода, содержащие после сушки 30-40% абразива. Исходная влажность отходов колебалась от 30 до 50% в бункерах для сбора отходов, но после отстоя на сетчатых поддонах достигала 20-25%.

После отстоя в воде в течение двух суток одна часть отходов, содержащих 3-5% масла, промывалась водой путем фильтрации ее через их уплотненный слой.

Другая часть отходов промывалась 1%-ным водным раствором серной кислоты с выделением водорода, а затем водой, путем фильтрации раствора и

воды через их уплотненный слой. После отстоя в течение 2 ч достигалась влажность отходов 20-25% по высоте слоя отходов. Смазочно-охлаждающая жидкость, удаляемая в ходе промывки, представляла собой 5%-ный раствор кальцинированной соды, масло попадало в отходы в результате утечки из гидросистем станков. Диспергирование осуществлялось на виброгрохоте с ячейками сита 4 мм. Масса высушенных на поддоне отходов была 6 кг.

После диспергирования отходы помещались на сетчатый поддон размером 600 x 600 мм, размеры ячеек 1 мм. Вентилятором мощностью 5,5 кВт под поддонами создавали разрежение. Через калорифер мощностью 6,6 кВт, размещенный над поддонами, засасывался воздух, нагретый до 50°C. Через каждые 5 мин фильтрующий слой взвешивался вместе с сетчатыми поддонами (без разрушения структуры фильтрующего слоя) и сушка проводилась до тех пор, пока не прекращалось изменение веса слоя.

Ниже приведены результаты термообработки отходов шлифования путем создания из них фильтрующего слоя заданной порозности: после диспергирования объем слоя возрастал в 1,5-2 раза.

В табл. 2 приведены результаты сушки отходов быстрорежущей стали. Согласно ей при влажности 30% резко замедляется скорость фильтрационной сушки из-за неустойчивости фильтрующего слоя, который разжижается, уплотняется и забивает сетку поддона. Без промывки отходов 1%-ным раствором серной кислоты время сушки имеет более выраженный минимум при влажности 15-20%, чем в случае промывки, когда при сушке в отходах выделяется дополнительное количество тепла за счет разложения и полимеризации масла. Однако одинаковое время сушки при исходных влажностях 15-20% говорит о более интенсивном процессе сушки в случае исходной влажности 20%, что свидетельствует о том, что сформированный при более низкой сыпучести слой, имея большую порозность, сушится боле

интенсивно за счет большего расхода теплоносителя и меньше уплотняется в ходе сушки, когда сыпучесть отходов должна возрастать с уменьшением их влажности. Но при выгрузке из поддонов отходов, сушка которых началась при исходной влажности 20-25%, они представляли собой рыхлые брикеты, особенно прочные в случае обработки отходов, промытых раствором серной кислоты. В последнем случае вообще не зафиксирован унос материала в ходе сушки, т.е. фактически сушке подвергались пористые брикеты.

В ходе неполной сушки отходов, промытых 1%-ным раствором серной кислоты, было обнаружено, что удаленные из сушилки отходы при влажности порядка 6-7% начинали дымиться, температура их подскакала до 90°C. В течение одного часа их отстоя на поддонах они полностью осушались. При этом оказалось, что количество органики в них уменьшилось примерно в 2 раза по сравнению с количеством ее в материале до его сушки. В таком материале, но подвергнутом полной сушке без отстоя, убыль органики достигала только 10-20%, хотя эти отходы обладали сыпучестью в несколько раз большей, чем после сушки свежих отходов, взятых прямо из-под станка и промытых водой. Например, при промывке 10-ю л водного раствора серной кислоты 80 кг отходов шлифования, при исходной их влажности 25%, в зависимости от процента растворенной кислоты (после реакции низкотемпературного разложения масла, протекающей после предварительной неполной сушки до влажности 7%, отстоя и дробления в шаровой мельнице в течение 10 мин) плотность после утряски была следующей: $\rho = 2,9 \text{ г/см}^3$ при промывке 1%-ным раствором H_2SO_4 , и она не изменялась при концентрации кислоты более 1 %; $\rho=2,3 \text{ г/см}^3$ при 0,5 % H_2SO_4 и $\rho= 2 \text{ г/см}^3$ - при 0% H_2SO_4 . Исходное содержание масла было 3,2%.

Содержание органики при $\rho = 2,9 \text{ г/см}^3$ достигало 1,5%. При $\rho = 2 \text{ г/см}^3$ оно не изменилось.

Наличие остатков масла сказывается на глубине магнитного разделения, которая при $\rho = 2,9 \text{ г/см}^3$ была 99,5%, при $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$ - 98,3%; при $\rho = 2 \text{ г/см}^3$ - 93%. При этом немагнитные примеси в концентрате имели размеры менее 100 мкм.

Сушка осуществляется пропусканием нагретых газов через фильтрующий слой отходов с втягиванием их под разрежением в патрубок вентилятора. При кратковременном перекрытии патрубка шибером поддоны перемещаются на один шаг в направлении выгрузки из сушилки.

Промывка металлоотходов раствором серной кислоты разрушает масляную пленку и инициирует процесс низкотемпературного разложения масла, ускоряет фильтрационную сушку, а также обеспечивает самоотверждение фильтрующего слоя и сохранение его структуры вплоть до окончания фильтрационной сушки.

Промывка материала водой обеспечивает удаление кислоты из слоя.

Доведение исходной влажности отходов до 20-25% обеспечивает устойчивую структуру фильтрующего слоя в ходе его сушки после последующего диспергирования материала.

Диспергирование отходов увеличивает их объем в 1,5-2 раза, что ускоряет процесс сушки.

Введение в материал в ходе формирования фильтрующего слоя известняка позволяет удалить серу из отходов (серу, содержащуюся в масле) в ходе последующего восстановительного отжига отходов и дополнительно закрепить структуру фильтрующего слоя, особенно при содержании абразива более 60% от веса отходов.

Пропускание через фильтрующий слой отходов дымовых газов насыщает его сажей, необходимой для последующего его восстановительного отжига, а также утилизирует их тепло.

1.3.5 Способ получения ультрадисперсного металлического порошкового материала

Изобретение относится к области порошковой металлургии и может быть использовано для производства порошков железа, меди, никеля, кобальта, вольфрама, молибдена и металлических сплавов химическими методами. Способ включает химическое осаждение по меньшей мере одного гидроксида металла щелочным раствором и образование суспензии, диафильтрацию полученной суспензии с отделением раствора по меньшей мере одного гидроксида металла, его дегидратацию, предварительный нагрев по меньшей мере одного гидроксида металла и его восстановление с получением металлического порошкового материала и последующую пассивацию указанного порошкового материала, при этом одновременно с диафильтрацией проводят сорбционную очистку суспензии, а восстановление гидроксида металла и пассивацию металлического порошкового материала проводят при активном перемешивании материала. Изобретение позволяет получить ультрадисперсный металлический порошок со структурой частиц, обладающих низким уровнем искажений и отсутствием протяженных дефектов, а также высокочистый металлический порошок, состоящий из частиц монодисперсного состояния при сохранении узкого фракционного состава и заданной морфологии, и обеспечивает возможность регулирования дисперсности на всех стадиях технологического процесса[20].

Работы в области получения порошковых материалов электрической эрозией ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: Юго-Западный государственный университет; Московский политехнический университет; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева; Институт материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН; Ростовский государственный университет путей сообщения; Институт электродинамики НАН Украины и др.

Значительный вклад в теорию и технологию получения порошковых материалов электроэрозионным диспергированием внесли ведущие специалисты, такие как: Лазаренко Б.Р.; Лазаренко Н.И.; Лившиц А.Л., Намитоков К.К.; Палатник Н.С.; Агеев Е.В.; Латыпов Р.А.; Еремеева Ж.В.; Алехин Ю.Г.; Байрамов Р.К.; Верхотуров А.Д.; Ершова Т.Б.; Щерба А.А.; Захарченко С.Н.; Фоминский Л.П.; Тарасов В.И.; Козярук О.И. и др.

В результате выполненных работ предложен ряд устройств и технологий, позволяющих получать порошковые материалы из токопроводящих отходов [17–34]. Однако в трудах этих ученых не рассматриваются вопросы, касающиеся особенностей получения порошковых материалов электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковых сталей.

Изложенное выше подтверждает, что тема диссертационного исследования является актуальной и направлена на решение научно-практической задачи утилизации отходов шарикоподшипниковой стали с низкой себестоимостью, невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса, и имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Целью работы являлась разработка способа получения порошковых материалов путем электроэрозионного диспергирования отходов шарикоподшипниковой стали в углеродсодержащей и кислородсодержащей рабочих жидкостях и его практическое применение.

В соответствие с поставленной целью решали следующие задачи:

Целью работы являлась разработка способа получения порошковых материалов путем электроэрозионного диспергирования отходов шарикоподшипниковой стали в углеродсодержащей и кислородсодержащей рабочих жидкостях и его практическое применение.

В соответствие с поставленной целью решали следующие задачи:

1. Исследование влияния электрических параметров установки ЭЭД на гранулометрический состав порошковых материалов. Определение оптимальных электрических параметров установки ЭЭД для диспергирования отходов шарикоподшипниковой стали.

2. Исследование строения и свойств порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде дистиллированной и керосине осветительном:

- гранулометрического состава;
- среднего размера частиц
- удельной площади поверхности;
- морфологии и элементного состава;
- фазового состава.

3. Исследование свойств спеченных образцов из порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали:

- микроструктуры и элементного состава;

- твердости;
- пористости;
- предела прочности при изгибе.

4. Исследование влияния свойств порошкового материала, полученного электроэрозионным диспергированием шарикоподшипниковой стали, на его спекаемость.

5. Разработка способа для получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали, пригодных к практическому применению.

1.4 Выводы к главе 1

1. В настоящее время работы в области получения порошковых материалов электрической эрозией ведутся в научных и высших образовательных учреждениях. Однако, до настоящего времени не рассматриваются вопросы, касающиеся особенностей получения порошковых материалов электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковых сталей.

2. Тема диссертационного исследования, направленная на решение научно-практической задачи по утилизации отходов шарикоподшипниковой стали с низкой себестоимостью, экологической чистотой процесса и невысокими энергетическими затратами, является актуальной и имеет важное народно-хозяйственное значение.

ГЛАВА 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ОТХОДОВ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

2.1 Строение металлических материалов

Эффективность использования материалов зависит от понимания факторов, влияющих на их свойства. Большая часть применяемых в технике веществ считаются металлическими, по этой причине в курсе материаловедения им уделяется основное внимание.

Металлы, как твердые, так и жидкие, характеризуются рядом свойств: металлическим сиянием, значительной тепло- и электропроводностью, нетрудной деформируемостью, возможностью переходить в сверхпроводящее положение при уменьшении температуры (возле абсолютного нуля), а при нагревании излучать электроны. Металлы в периодической системе Д.И. Менделеева составляют около 80% всех элементов.

Отчетливую границу между металлом и неметаллом провести довольно трудно, особенно для элементов с несколькими модификациями, одна из которых металлическая, а другая неметаллическая (например, белое и серое олово). В то же время следует отметить, что соединения и сплавы металлических элементов – металлов почти всегда являются металлами. Можно отметить лишь единичные случаи, когда соединение двух металлов не является металлом, например $MgSn$. Утверждение же, что соединение металла с неметаллом дает неметалл, справедливо не всегда. Так, соединения многих чистых металлов с водородом, углеродом, азотом сохраняют металлический характер и их можно причислить к металлам.

Из всего ряда качеств характеристикой, более свойственной сплавам, считается проводность: сплавы владеют существенно более значительной электропроводностью в сравнении с неметаллами (электропроводность типичного металла меди при комнатной температуре $6,47 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а у типичного диэлектрика кварца $10^{-17} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$). Помимо этого, у металлов проводность понижается с увеличением температуры, у неметаллов она увеличивается.

В настоящее время хорошо известно, что особенности элементов, в первую очередь, формируются электрическим строением атомов. Энергия атома считается важнейшей чертой электрона. Она находится в зависимости от уровня, который занимает электрон в электронной оболочке атома, т. е. от удаления от ядра. Энергетический уровень электрона можно охарактеризовать четырьмя квантовыми числами: главным квантовым числом n , определяющим основной вклад в энергетический уровень; орбитальным квантовым числом l , являющимся, согласно Бору, мерой момента количества движения электрона по орбите; магнитным квантовым числом m_l , описывающим расщепление уровней энергии в слабом магнитном поле; спиновым квантовым числом s , которому приписывается смысл магнитного момента электрона, принимающего значения $\pm 1/2$.

По заполнению электронами внешних подуровней металлы разделяются на две подгруппы: 1) *простые*, у которых электроны на d -подуровне отсутствуют (Li, Na, Ca, Al и др.) либо d -подуровень заполнен полностью (Cu, Zn, Cd, Ag и др.); 2) *переходные*, у которых заполнение d -подуровня начинается при частично заполненном d -подуровне следующей оболочки. К числу переходных относятся важнейшие металлы, используемые для создания конструкционных материалов: Fe, Ni, Co, Mo, Mn, Cr, V, Nb, Zn, Ti.

Отмеченные выше отличия свойств металлов и неметаллов обусловлены различным характером межатомной связи в этих материалах.

Типы межатомной связи

Известно четыре основных типа межатомных связей: металлическая, ионная, ковалентная и межмолекулярная (ван-дер-ваальсовская).

Ионная связь проявляется в случае так называемых ионных кристаллов (химических соединений типа KCl , KBr и т.д.). В этом случае образование связи происходит путем передачи атомом одного элемента своего валентного электрона атому другого элемента. Переход электрона от одного элемента к другому приводит к образованию положительного и отрицательного ионов, которые притягиваются друг к другу электростатически. Образование ионной связи удобно рассмотреть на примере соединения NaCl . Атом Na имеет один «лишний» валентный электрон. В то же время атому Cl , имеющему семь валентных электронов, для образования устойчивой оболочки, состоящей из восьми электронов, «не хватает» одного электрона. Атом Na передает свой валентный электрон атому Cl , в результате образуется положительный ион Na^+ и отрицательный ион Cl^- , которые, притягиваясь, создают ионную связь.

Ковалентная связь чаще всего проявляется при образовании молекул из атомов одного элемента (например, H_2 , O_2 , Cl_2 и т.д.). Этот тип связи осуществляется путем обобществления валентных электронов двух атомов, переходящих на общую орбиту. Так, в двух атомах водорода имеется по одному валентному электрону. Для обеспечения устойчивой орбитали, состоящей из двух электронов, каждый атом нуждается еще в одном электроне. Поэтому оба атома передают свои электроны на обобществленную орбиталь, которая теперь принадлежит не одному, а обоим атомам, входящим в молекулу. Эта связь является направленной.

Межмолекулярная, или ван-дер-ваальсовская, связь осуществляется между нейтральными молекулами. Силы притяжения и отталкивания в этом случае также имеют электромагнитную и квантовую природу. Действие сил Ван-дер-Ваальса достаточно слабое, поэтому молекулярные соединения имеют, как правило, низкую температуру плавления.

Металлический вид взаимосвязи характеризуется тем, что при сближении атомов валентные электроны утрачивают принадлежность к единичным атомам и становятся всеобщими, создавая так называемый «электронный газ». Взаимосвязь в данном случае обуславливается электростатическим притяжением среди положительно заряженным ионным каркасом и отрицательно заряженным электронным газом. Данный особенный вид взаимосвязи в сплавах (ненаправленной) и объясняет большая часть свойственных для сплава качеств (высокую электро- и теплопроводимость, отличную деформируемость и т.д.).

При абсолютно всех видах межатомной взаимосвязи атомы стараются разместиться на таких расстояниях друг от друга, для того чтобы сила взаимодействия была наименьшей (таблица 2.1, рисунок 2.1). Так как атомы химически неразличимы в веществе, в таком случае минимум энергии достигается в то же время для значительного количества атомов, пребывающих на схожих расстояниях друг от друга и образующих кристаллическую решетку.

Таблица 2.1 – Соотношение величин энергии при различных типах связи

Назв. ячейки	Тип связи						
	межмолекулярная		ионная	ковалентная	металлическая		
	He	Ar	NaCl	SiC	Fe	Mo	W
Кристал. энергия, кДж/моль	0,092	6,3	750	1180	396	670	880
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	-272,4	-189,4	801	–	1539	2625	410

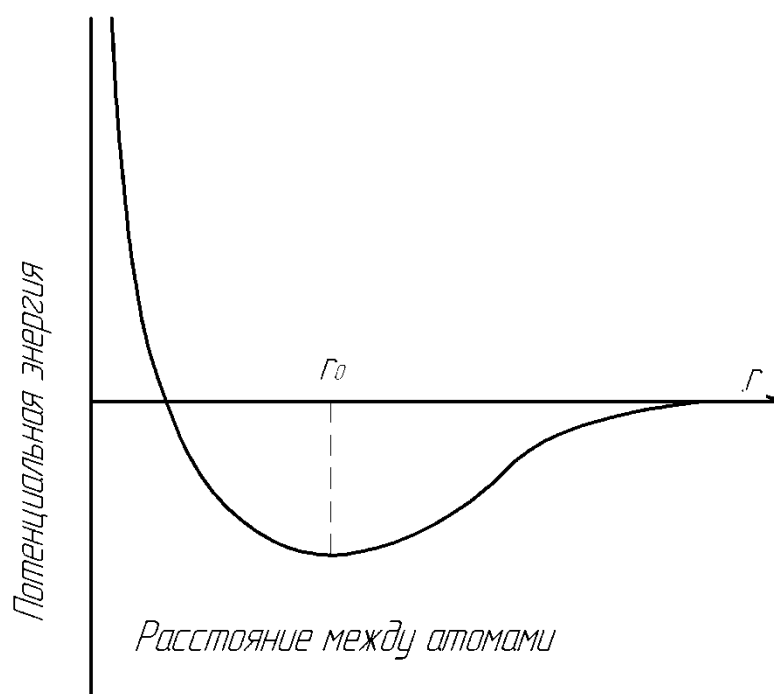


Рисунок 2.1 – Изменение энергии связи при сближении атомов в кристалле

Как видно из приведенных данных, наблюдается определенная связь между энергией межатомной связи и свойствами элементов, в данном случае с температурой плавления. В металлах $T_{пл}$ значительно выше, чем в

молекулярных кристаллах, а кристаллы с ковалентной связью, как правило, плавятся при более высоких, по сравнению с металлами, температурах. С увеличением энергии связи возрастают и такие характеристики, как упругие модули, энергии активации самодиффузии и др.

Кристаллическое строение металлов

Описание физических свойств металлов основано на понимании особенностей их кристаллического строения. Кристаллическую структуру образца металла часто можно установить даже невооруженным глазом. В образцах с крупными зернами после шлифовки и травления зерна различным образом отражают свет, вызвано это различным воздействием травителя на материал различных зерен.

Для более детального исследования кристаллического строения металлов требуется применение методов микроскопии (оптической или электронной) или же методов рентгеноструктурного анализа.

Для того чтобы детально исследовать и понимать внутреннее кристаллическое строение металлов, необходимо освоить основные понятия, которые характеризуют кристаллическую структуру и позволяют отличать один металл от другого.

Как и во многих других случаях, рассмотрение внутреннего строения металлов требует использования некоторых идеализации.

Закономерное размещение атомов в кристалле описывается кристалльной решеткой, т. е. многомерным, время от времени циклическим месторасположением атомов в абсолютно всем размере кристалла. Подобно тому, как на обоях элемент рисунка чередуется в двух направлениях, так в кристаллической решетке узор в расположении атомов чередуется в трех измерениях. Поочередные передвижения узора на конкретные дистанции, именуемые трансляциями решетки, дают возможность поочередно проделать

путь все без исключения зоны кристалла. Элементарный, т. е. минимальный объем, который определяет характерные черты структуры кристалла этого сплава (узор в месторасположении атомов), именуется простой ячейкой.

Несмотря в колоссальное число разных кристаллических решеток чистейших металлов в особенности сплавов и хим сочетаний, согласно симметрии все без исключения решетки имеют все шансы быть распределены в 7 ключевых групп (сингоний), которые отличаются между собой соотношениями периодов согласно 3 главным осям и углами между осями. Периоды трансляции по осям (периоды решеток, или осевые единицы) принято обозначать буквами a , b , c (соответственно вдоль осей координат X , Y и Z), а углы α , β и γ . причем α лежит против оси X , т. е. между осями Y и Z , β – между Z и X , а γ – между X и Y , Характеристики вышеупомянутых семи сингоний приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Кристаллические системы элементов

Кристаллические сингонии	Система координат	Примеры
Триклинная	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$	$K_2Cr_2O_7$
Моноклинная	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ > \gamma$	β -S, Pu
Ромбическая	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	α -S, Ga, Fe_3C
Ромбоэдрическая	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Sb, Bi
Гексагональная	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$	Zn, Cd, Ni, As
Тетрагональная	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	β -Sn (белое), TiO_2
Кубическая	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Cu, Fe, NaCl

В случае если б атомы находились только лишь в вершущах углов ячеек, в таком случае, в любой из сингоний ячейки разных элементов различались б только лишь различными величинами углов и аксиальных единиц. Однако в отдельных кристалльных сетках атомы имеют все шансы размещаться, кроме того, и в фокусах простых ячеек и в фокусах границ. С учетом этого обстоятельства из описанных выше семи сингоний может быть образовано 14 типов пространственных решеток, получивших название решеток Бравэ: 1) триклинная; 2) моноклинная простая (атомы расположены только в вершинах ячейки); 3) моноклинная объемно-центрированная; 4) ромбическая простая; 5) ромбическая с центрированными основаниями; 6) ромбическая объемно-центрированная; 7) ромбическая гранецентрированная; 8) тетрагональная простая; 9) тетрагональная объемно-центрированная; 10) гексагональная; 11) ромбоэдрическая; 12) кубическая простая; 13) кубическая объемно-центрированная; 14) кубическая гранецентрированная.

Большая часть металлов кристаллизуется тремя видами решеток: гранецентрированной кубической, объемно-центрированной кубической и гексагональной. Эти три вида решеток показаны на рисунке 2.2.

Периодом кристаллической решетки именуется дистанция среди серединами 2-ух располагающихся рядом атомов, находящихся вдоль правильно подобранных осей ячейки (при таком подборе гарантируется её наименьший размер). Периоды кристаллических решеток измеряют в нанометрах (10^{-9} м), либо в ангстремах ($1 \text{ нм} = 10 \text{ \AA}$, т.е. $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ м). У большинства металлов периоды решеток меняются от 0,25 до 0,55 нм.

Число атомов, которые пребывают в более тесном и одном и том же расстоянии от каждого свободно выбранного атома в решетке называют координационным числом. Для объемно-центрированной кубической (ОЦК)

решетки координационное число принимают равным 8. Для гранецентрированной кубической решетки (ГЦК) координационное число 12 (каждый атом в углах куба имеет по три ближайших соседа, расположенных в центрах граней на расстоянии $a = \sqrt{2}/2$ от угловых).

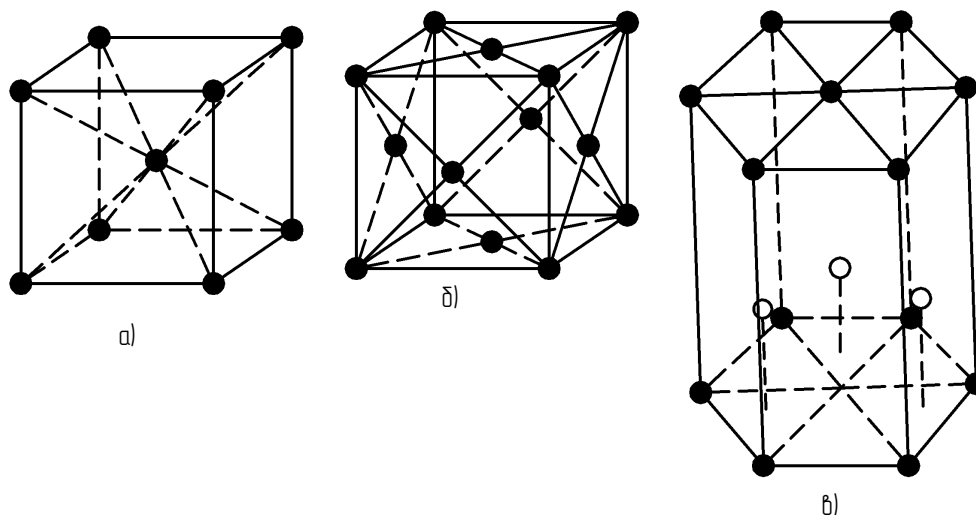


Рисунок 2.2 – Элементарные ячейки плотноупакованных кристаллических решеток: *a* – объемно-центрированная кубическая;

б – гранецентрированная кубическая; *в* – плотноупакованная гексагональная

При этом необходимо принимать во внимание, то что любой атом в середине границы относится, в то же время, 2 соприкасающимся ячейкам. Однако, помимо этого, необходимо принять во внимание, то, что любой атом в углу кубика относится, в то же время, 8 примыкающим ячейкам, в любой из которых, кроме того, существует 3 иных атома на тех же расстояниях $\frac{(a\sqrt{2})}{2}$

. Следовательно, координационное число, будет равняться $3 \cdot (1/2) \cdot 8 = 12$. В гексагональной плотноупакованной решетке (ГПУ) координационное число также равно 12: каждый атом в базисной плоскости (см. рис. 2, в)

имеет 6 ближайших соседей в углах гексагона, а затем еще по 3 атома в верхнем и нижнем слоях соответственно.

Число атомов которые приходятся на одну элементарную ячейку именуется *базисом решетки*. Следует отметить, что атомы в углах ячеек принадлежат одновременно 8 ячейкам, атомы, расположенные в центрах граней, – двум ячейкам. Тогда базис ГЦК равен 4, базис ОЦК составляет 2 и базис ГПУ равен 6.

Вычислив отношение объема, занимаемого атомами с условно сферической формой V_a , ко всему объему ячейки V_p , т.е. $\eta = V_a/V_p$, можно узнать коэффициент компактности решетки η . Для ОЦК решеток коэффициент компактности принимают равным 0,68, для ГЦК он составляет 0,74 и для ГПУ равен 0,74 (при $c/a = 1,633$).

При постановлении задач, важных перед металлографией, следует обладать концепцией обозначений с целью записи ориентации границ кристалла и плоскостей, находящихся изнутри кристалла. Данные обозначения обязаны предоставлять только ориентацию, однако никак не обязательно устанавливать точное положение плоскостей в кристалле. Для данной цели установлены индексы Миллера (H, K, L). В отличие от природной записи расположения плоскости величинами отрезков, отсекаемых ею в осях местоположение, данные индексы вписывают в возвратных величинах, т. е. индексы Миллера отвечают величинам, возвратным величинам отрезков, отсекаемых плоскостями в осях местоположение. Величины же отрезков проявляются количеством этапов трансляции. В случае если область ориентирована одновременно одной с осей местоположение, в таком случае является, то, что она пересекает данную линию в безграничности и показатель станет равным нулю, в случае

если одновременно 2 осям, в таком случае 2 индекса равны нулю (рисунок 2.3).

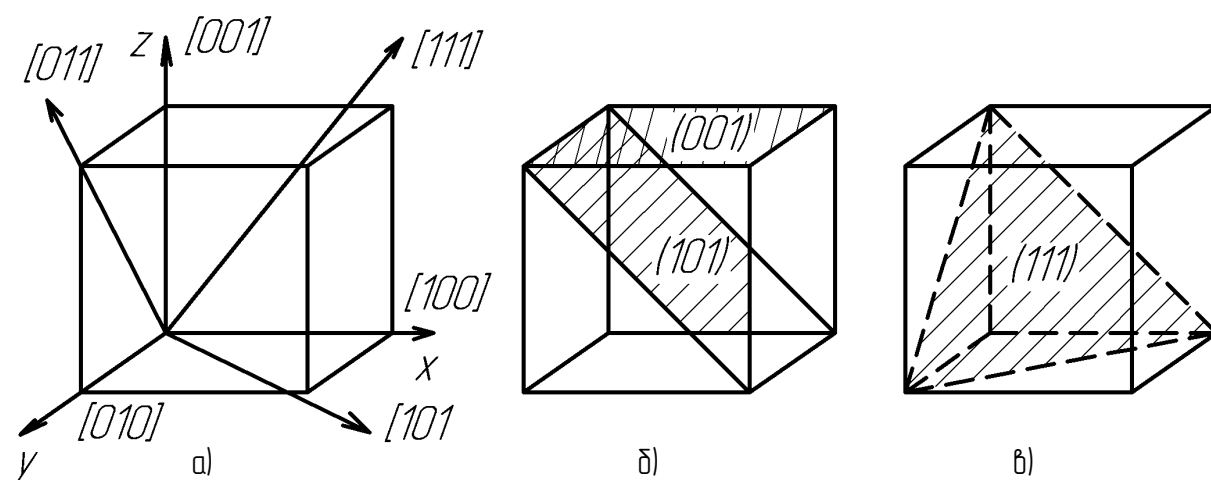


Рисунок 2.3 – Кристаллографические индексы направлений (а) и плоскостей (б, в) в кубических решётках

Чтобы определить индексы Миллера, необходимо выполнить следующие действия: найти отрезки, отсекаемые плоскостью на осях координат, измеренные в осевых единицах (периодах решетки), взять обратные значения этих чисел и привести эти значения к целым числам. Например, рассматриваемая плоскость отсекает на оси X отрезок равный 1, на оси Y – равный $2/3$, на оси Z – $1/2$ периодов трансляций. Тогда отрезки, обратные указанным, будут равны 1 , $3/2$ и 2 . После приведения этих дробей к общему знаменателю получим числители, равные индексам данной плоскости, т.е. $h = 2$, $k = 3$, $l = 4$. Полученные числа записывают в указанном порядке и заключают в круглые скобки: (234).

При индцировании направлений, одну точку прямой помещают в начало координат, а другую получают путем последовательного векторного сложения 3-х перемещений, параллельных трем осям координат. Например,

точка на прямой, проходящей через начало координат, смещается на H осевых единиц вдоль оси X , K осевых единиц вдоль оси Y , L единиц вдоль – оси Z . Тогда, если H , K и L – три взаимно простых числа, то они являются индексами направления. При этом важно отметить, что при определении индексов направлений не нужно пользоваться обратными значениями длин отрезков, отсекаемых на осях координат. В отличие от индексов плоскостей индексы направлений принято заключать в квадратные скобки, например $[121]$ или $[130]$. В кубической решетке направления с любыми индексами всегда перпендикулярны плоскостям с такими же индексами. Но в других кристаллических решетках это положение не выполняется, за исключением небольшого числа плоскостей в тетрагональной и ромбической решетках, а именно плоскостей, параллельных осям координат. Во всех решетках индексы осей X , Y и Z обозначаются как $[100]$, $[010]$ и $[001]$ соответственно. Индексы диагоналей граней: $[110]$, $[011]$ и $[101]$; пространственной диагонали: $[111]$.

Один из более известных и непосредственных способов установления вида кристалльных решеток и габаритов простых ячеек считается способ рентгеноструктурного разбора. Допустимо кроме того установление данных величин с поддержкой дифракции электронов и нейтронов.

Анизотропия кристаллов

Физические особенности кристаллов, возможно, поделить в 2 категории. К одной группе принадлежат особенности, никак не зависящие от направленности в кристалле. Подобным качеством является, к примеру, уплотненность, характеризуемая соответствием меж весом и размером. Для кристаллов кубической симметрии с направления никак не находятся в зависимости и подобные качества, как электропроводимость и коэффициент преломления. Однако большая часть качеств, в том числе и для кристаллов с

кубической сеткой, находятся в зависимости от направлений, т. к. в различных направленностях разнообразна насыщенность местоположения атомов. Зависимость качеств от направления в кристалльной решетке именуется анизотропией. Так, например, в ГЦК решетке расстояние между атомами вдоль ребра куба (направление $[100]$) на 41% больше, чем вдоль диагонали грани ($[\overline{1}00]$ или $[10\overline{1}]$) и это приводит к различию упругих модулей, магнитных и других характеристик, измеренных в этих направлениях.

В случае если пример складывается из монокристалла, в таком случае анизотропия качеств выражается в наиболее крупный уровне. Наоборот, в поликристалле, состоящем из значительного количества неодинаково направленных зернышек, анизотропия качеств отсутствует, равно, как общепринято сказать, сплав изотропен, т. е. его качества в абсолютно всех направленностях равны. В поликристаллических веществах анизотропии качеств достигают формированием в большей степени равной ориентировки многочисленных зернышек в том либо другом течении. Подобная предпочтительная, однако, никак не совершенно равная ориентация зернышек именуется текстурой. В сплавах текстуры возникают в следствии деформации и отжига деформированных эталонов, обработки использованных материалов в электро и магнитных полях. Текстурированные эталоны применяют, к примеру, при изготовлении электротехнических сталей.

Полиморфизм

Рассматривая проблему о кристаллических решетках сплавов, необходимо выделить, то, что для одной и той же подгруппы периодической системы элементов, сплавы кристаллизуются, как правило, с образованием элементарной ячейки схожего вида. Таким образом, большая часть щелочных

металлов содержит пространственно-центрированную кубическую решетку, щелочноземельных – гексагональную плотноупакованную (за исключением бария, который имеет ОЦК решетку). Между тем для многочисленных сплавов свойственно наличие 2-ух или же 3-х видов кристаллических решеток. Например, железо при низких температурах имеет ОЦК решетку (α -железо), при нагреве до 919°C перестраивается в ГЦК решетку (γ -железо), а при 1392°C – снова в ОЦК решетку (δ -железо), но период уже имеет отличия от низкотемпературной модификации.

В 1868 г. проявление *полиморфизма* в железе открыл Д.К. Чернов. Многочисленные иные технически значимые сплавы (ориентировочно 20) также обладают рядом модификаций. Например, у титана насчитывают всего лишь две модификации: ГПУ (α -титан) и ОЦК (δ -титан), кобальт – ГПУ (α -кобальт) и ГЦК (δ -кобальт).

Сам факт существования различных кристаллических решеток у 1-го компонента в различных температурных областях именуется полиморфизмом. Трансформация от 1-го вида решетки ко второму именуется полиморфным перевоплощением. Оно сопряжено с тем, что у компонентов совершается переназначение атомов в виду того, что начиная с определенной температуры термодинамически наиболее стабильно размещение атомов в конфигурации новейшей решетки.

Полиморфные перевоплощения имеют все шансы осуществляться не только лишь в следствии перемены температуры, но еще и под воздействием больших давлений. Более эффективным примером технологического применения протекания полиморфизма под воздействием значительных давлений (вплоть до 104 МПа, или 100 000 ат.) считается извлечение искусственных бриллиантов с графита.

Благодаря использованию явления полиморфизма, как будет рассмотрено ниже, имеется шанс в существенной степени менять особенности обширного охвата применяемых в технике конструкционных используемых материалов (сплавов на основе железа, титана, кобальта и иных компонентов).

Самым известным методом изучения полиморфных превращений является метод рентгеноструктурного анализа, позволяющий путем съемки рентгенограмм при различных температурах непосредственно получать данные о типе кристаллических решеток одного и того же металла.

Магнитные превращения

Помимо осмотренных полиморфных перевоплощений, заключающихся в перестройке кристаллических решеток, в сплавах имеют все шансы отслеживаться перевоплощения, никак не приводящие к изменению вида решетки. Они состоят в перестройках электронных слоев, предопределенных переменной магнитных моментов. Подобные обращения называют магнитными.

Известно, то, что атомы металлов с целиком наполненными электронными слоями (таковые как Na, K, Ag, Au, Cu и др.) никак не обладают результирующим магнитным моментом. Данные материалы диамагнитны. В случае если же внутренняя электрическая оболочка атомов переполнена не целиком (у металлов Fe, Co, Cr, Ni и др.), в таком случае подобные атомы владеют конкретным магнитным фактором, а сами материалы имеют все шансы являться как ферромагнитными, так и парамагнитными.

Магнитные обращения состоят в том, собственно многочисленные материалы при изменении температуры имеют все шансы переключаться из одного состояния в иное: ферромагнетики (такие как Fe, Co, Ni) при

увеличении температуры переключаются в парамагнетики, а при снижении температуры определенные ферромагнетики передаются в антиферромагнетики. Температура, больше которой ферромагнитные материалы ведут себя как парамагнетики, именуется температурой Кюри; температура, ниже которой ферромагнетики переключаются в антиферромагнитное положение, именуется температурой Нееля. Температура Кюри для железа 770°C , никеля 358°C , кобальта 1120°C . Антиферромагнитные свойства обнаруживаются у хрома при температуре ниже 38°C , у марганца – ниже -100°C . Такие же свойства присутствуют и у большого количества редкоземельных металлов.

Существуют и другие магнитные явления, такие как *метамагнетизм*, т. е. смещение температуры перехода от ферромагнитного к антиферромагнитному под действием магнитного поля (температура Нееля сдвигается в область более высоких температур).

Один с значимых явлений, сопряженных с протеканием магнитных превращений, считается магнитострикция, т. е. перемена габаритов кристаллов при переходе сплава с парамагнитного состояния в ферромагнитное (далее точки Кюри), разное по величине для различных кристаллографических течений. Магнитострикция способен появляться и в следствии намагничивания стандарта под воздействием приложенного наружного магнитного поля. Константой магнитострикции λ ,

иногда условное растягивание эталона в направлении поля при его намагничивании вплоть до насыщения. Постоянная магнитострикции способен являться позитивной и негативной. У никеля, к примеру, λ негативна, при намагничивании никеля совершается уменьшение эталона в направленности намагниченности, по этой причине растягивание стандарта в магнитном поле усложняет ход намагничивания, сокращение же, напротив,

упрощает. У железа постоянная магнитострикции позитивна, при намагничивании экземпляр удлиняется в направленности магнитного поля. Как верно классифицируется постоянная магнитострикции.

В монокристаллах константа магнитострикции зависит от кристаллографических направлений. Так, у никеля в направлении $[100]$ $\lambda_{[100]} = -45,9 \cdot 10^{-6}$, а в направлении $[111]$ $\lambda_{[111]} = -24,3 \cdot 10^{-6}$, т.е. изменяется почти в два раза. В поликристаллических веществах, как правило, магнитострикция изотропна, т. е. одинакова для любого направления образца.

Материаловедам и конструкторам необходимо учитывать явления магнитострикции при выборе материала и конструировании деталей, особенно работающих в присутствии магнитных полей.

2.2 Сущность процесса ЭЭД

Процесс электроэрозионного диспергирования – это разрушение токопроводящего используемого материала вследствие местного воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами. В пределах воздействия разряда, под влиянием значительных температур, происходит нагревание, расплавление и неполное испарение используемого вещества.

С целью получения высокой температуры в узкой зоне небольшого объема нужно значительное сосредоточение энергии. Достижение этой цели осуществляется применением импульсного напряжения, а процесс ЭЭД осуществляется в жидкой среде, т.е. рабочей жидкости (РЖ), которая наполняет интервал между электродами, именуемый межэлектродным промежутком (МЭП) либо межэлектродным зазором.

Каждая гладкая поверхность обладает собственным макро- либо микрорельефом, между двумя электродами постоянно находятся два места,

промежуток между которыми достаточно мал, нежели между другими местами электродов. При подсоединении к электродам источника электрического тока между ними начинает протекать электроток, и появляется электрическое поле с напряженностью на участке с наименьшим промежутком между электродами мал, достигает максимального уровня. Расположение этого места находится в зависимости от неровностей на электродах, габаритов электропроводных крупниц, находящихся в интервале между электродами.

В настоящее время много представлений, которые объясняют электрическую эрозию температурным действием электрического разряда. Из существенного числа предложенных концепций механизмов электрической эрозии наиболее общепризнанными считаются следующие: электродинамическая теория электрической эрозии, обоснованная Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко [35, 36], тепловая теория электрической эрозии, предложенная Б.Н. Золотых [37–39], и другие теории, нашедшие дальнейшее развитие в работах А.Д. Верхотурова [40, 41], К.К. Намитокова [42, 43] и других исследователей [44–53].

С целью описания процессов, которые совершаются при электрическом разряде, поделим их на 3 стадии:

Начальным этапом процесса ЭЭД является пробой межэлектродного промежутка, начинает образовываться разрядный канал. В следствие чего, образовывается зона с полем повышенной напряженности. Происходит процесс ионизации РЖ в интервале, через который проходит электроток, т.е. происходит образование канала разряда. Канал разряда – относительно узкая цилиндрическая область, которая наполнена подогретым материалом (плазмой), содержащим ионы и электроны.

Если увеличивать напряжение в период до начала пробоя, то это приводит к появлению электромагнитного поля, которое действует на взвешенные частицы, присутствующие в РЖ, и вынуждает их выстраиваться в конкретном порядке. Длительность периода до начала пробоя зависит от вида РЖ и может достигать 50 мкс. Затем под воздействием этого поля совершается процесс формирования новых заряженных частичек. Равновесие энергии подчиняется концепции Таунсенда [64]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)) = j \cdot E + P - \frac{\partial}{\partial t}(W_0 - W) \cdot n, \quad (2.1)$$

где, Q – количество тепла;

t – время;

λ – теплопроводность;

T – температура;

j – плотность тока;

E – напряженность электрического поля;

P – неэлектрическая мощность, поглощаемая извне;

W_0 – энергия возникновения заряженной частицы из нейтральной, находящейся в некоторых «нулевых» физических состояниях;

W – энергия, которой в среднем обладают нейтральные частицы при данных физических условиях;

n – плотность возникающих отрицательно заряженных частиц.

Значительная доля электроэнергии, которая выделяется в единице объема ($j \cdot E$) и неэлектрической энергии, впитываемой снаружи (P), тратится на формирование новейших заряженных крупниц. Создание значительного числа заряженных крупниц приводит к увеличению скорости канала до нескольких км/с, который состоит из электронов плотностью $10^{22}/\text{м}^3$ [52].

Выход термической энергии ($\frac{\partial Q}{\partial t}$) приводит к повышению температуры канала разряда до 12000–30000 К [42–45]. Утраты энергии из-за теплопроводности ($\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T))$) на этом этапе процесса ЭЭД малы из-за небольшой продолжительности. Некоторое количество выделяемой энергии расходуется на кипение и разложение рабочей жидкости [56].

К уменьшению сопротивления приводит формирование канала проводимости, а, таким образом, и к сокращению напряжения и повышению электрического тока в канале разряда. По каналу разряда проходит электроток, при этом темп увеличивая его силы способен подниматься до сотен килоампер в одну секунду. К окончанию 1 стадии напряжение уменьшается вплоть до «напряжения эрозии». Температура канала разряда опускается вплоть до 8000–10000 К [52–55]. За данный период времени на плоскости электродов сплав нагревается вплоть до температуры кипения. На этой стадии процесса эрозия протекает в небольших объемах в паровой фазе.

Второй стадией считается формирование возле канала разряда газового пузыря из паров жидкости и сплава, а так же нагревание электродов. Формирование разряда в МЭП сопровождается возникновением ударной термической волны, которая появляется в первоначальных этапах разряда и приводит к формированию пузыря газа в РЖ [52]. Разрез канала разряда мал, а его расширению мешает магнитное поле, которое сдавливает канал. Эту же роль осуществляет и рабочая жидкость, находящаяся вокруг канала разряда. Протяженность канала и его диаметр весьма незначительны, и по этой причине насыщенность энергии в нем доходит крупных величин, а температура в данном локальном объеме – десятков тыс. градусов [57–59]. Из-за высочайшего давления ($2 \cdot 10^7$ Па) канал разряда стремится возрасти, сдавливая находящуюся вокруг его газовую фазу. Из-за инерции, сперва

газовый пузырь и находящаяся вокруг его рабочая жидкость неподвижны, потом наступает их расширение. Пределы канала разряда перемещаются с большой скоростью в радиальном направлении. Скорость расширения способна достигать до значения 150–200 м/с. На внешней границе образовывается так называемый фронт уплотнения, в котором давление неравномерно изменяется от начального в рабочей жидкости вплоть до высочайшего на рубеже фронта.

На данной стадии напряжение и электрический ток стабилизируются (либо совершают небольшие колебания около неизменной величины).

Направленное течение электронов, которые отрываются от катода, находится в связи с поверхностью анода, задерживается, создавая условия к превращению кинетической энергии в теплоту, которая впитывается поверхностным слоем анода. В итоге нагревание анода рассматривается равно как итог воздействия плоского источника тепла. Рассмотрим уравнение, которое описывает температурное поле источника, действующего в течение времени τ [39]:

$$T(r, z, \tau) = \frac{8 \cdot q \cdot a \cdot k}{c \cdot \rho \cdot (\pi \cdot a)^{3/2}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau} \cdot (4 \cdot a \cdot k \cdot \tau + 1)} \cdot e^{-\left(\frac{k \cdot r^2}{4 \cdot a \cdot k \cdot \tau} + \frac{z^2}{4 \cdot a \cdot \tau}\right)}, \quad (2.2)$$

где, r_i, z_i – координаты точек в поперечном сечении лунки;

r – радиус канала искрового разряда;

z – глубина лунки на поверхности анода после прохождения импульса искрового разряда;

τ – длительность импульса;

q – удельный тепловой поток, принятый постоянным за время τ ;

a – коэффициент температуропроводности;

k – коэффициент характеризующий остроту кривой распределения теплового потока по радиусу источника.

На плотность термического потока оказывают большое влияние состав рабочей жидкости, характеристики разрядного контура установки и основа электродов [60, 61]. Темп. кипения и диэлектрическая прочности рабочей жидкости напрямую влияют на температуру разряда канала, которая доходит до 8000–10000 К [64]. Температура расплавленного вещества пропорциональна количеству выделяемой энергии, а в глубине лунки – температуре плавления. В источнике ответа задачи Стефана устанавливается связь между температурой и плотностью энергии в центре источника:

$$E_0 = \lambda \cdot \frac{2 \cdot (T - T_{\text{пл}}) \sqrt{\tau}}{\sqrt{2} \cdot e \cdot r \cdot f \cdot (\alpha / 2 \cdot \sqrt{a}) \sqrt{a}}, \quad (2.3)$$

где, $T_{\text{пл}}$ – температура плавления.

Глубина проплавления (лунки) может быть рассчитана по формуле [41]:

$$B_0 = E_0 / \sqrt{\tau}. \quad (2.4)$$

Энергия газов, наполняющая возникшую полость газового пузыря, увеличивается, чему содействует выброс паров с плоскости расплава,

содержащегося в лунке. Результат этого – последующее увеличение газового пузыря [41].

Стадией под номером три станет окончание тока, отрывание ударной волны с газового пузыря и развитие его расширения согласно инерции, вывод продуктов эрозии.

Уже после окончания электрического импульса и перехода силы через максимум, увеличение энергии газа, содержащегося в пузыре, стремительно тормозится и уже никак не способен возместить диссипации энергии, сопряженной с дилатацией по инерции расширением пузыря выделяемого газа и уменьшением насыщенности испарения.

Давление изнутри пузыря газа начинает стремительно снижаться. Так как температура и высокое давление газов опускается существенно активнее, нежели температура плоскости лунки, это приводит к добавочному выбросу не очень больших порций паров с плоскости уже после завершения импульса тока.

Ударная волна гасится находящейся вокруг рабочей жидкостью. Поначалу этой стадии в промежутке между электродами пребывают жидкий сплав в углублениях электродов (лунках); газовый пузырь, в глубине которого существуют пары сплава; РЖ.

Расплавленный и парообразный используемый материал попадает из в РЖ, находящуюся вокруг него. После выброса их области разряда материал охлаждается со скоростью 10^6 – 10^9 К/с [52] и затвердевает в рабочей жидкости с образованием единичных крупиц. Подобные течения, но в наименьшем масштабе, совершаются и при взаимодействии ионов с поверхностью катода, разрушение которого совершается в большей степени в паровой фазе [52].

Все без исключения эти процессы совершаются в весьма небольшие отрезки времени. Происходит выделение огромной энергии, по этой причине они носят активный взрывной характер.

В зоне воздействия импульса тока на плоскости электродов возникают маленькие углубления – лунки, сформировавшиеся из-за удаления пульсирующим разрядом определенного количества использованного материала. Объем используемого материала, удаленного одиночным импульсом с плоскости обрабатываемой части, и форма образовавшейся лунки находятся в зависимости от энергии пульсирующих разрядов, их продолжительности и свойств диспергируемого вещества.

В процессе диспергирования выбрасываемые частицы выделяются из лунки в жидком и парообразном агрегатном состоянии, а кроме того и вследствие хрупкого откалывания [62]. При этом объем удаляемого с лунки использованного материала в жидкой фазе повышается с возрастанием энергии и продолжительности импульса, а те частички, которые образовались из паровой фазы, слипаются друг с другом, и начинают формировать скопления частиц неправильной геометрической формы [58].

Таким образом, исполняется электрическая эрозия использованного материала, изображенная на примере воздействия 1-го импульса, с образованием одной эрозионной лунки на плоскости и крупниц порошка в рабочей жидкости. Уже после остановки воздействия пульсирующего разряда напряжение в электродах опускается. Начинается процесс деионизации рабочей жидкости, т.е. ослабление заряженных крупниц, и электрическая прочность рабочей жидкости возобновляется. МЭП подготавливается с целью прохождения следующего разряда. В случае если деионизация никак не совершается (из-за большой продолжительности импульса либо небольшого периода между импульсами), в таком случае

разряд преобразуется в другой. При таком [43, 63] доминирует разрушение катода из-за воздействия ионов. В случае если интервал между пульсирующими разрядами, время от времени прибывающими на электроды, характерен для деионизации РЖ, в таком случае процедура станет возобновляться с образованием новейших эрозионных лунок в плоскости и крупиц порошкового материала. Где дистанция среди электродов минимальна, там будут проходить новые разряды. Этим и обуславливается процесс ЭЭД.

Разряды, происходящие в МЭП, имеют отличия друг от друга и по характеру и эффекту эрозии их принято делить на три основных вида:

1. В дальнейшем, после пробоя промежутка между электродами, частицы жидкого вещества и его пары свободно удаляются из области разряда. На плоскости электродов остается только небольшой объем жидкого вещества, который, застывая, сформирует тоненькую пленку. Выплавка вещества с плоскостей электродов совершается под влиянием большой температуры канала разряда.

В данном случае нагревание вещества от непосредственного протекания в нем тока минимален и в ходе съема вещества почти никак не принимает участие. Снятие вещества совершается за счет воздействия источника тепла, коим считается канал разряда при умеренном распространении тепла в глубину вещества электродов.

Такой порядок электроэрозионного диспергирования является обычным, и результат эрозии – максимальный.

2. После того как импульс электрической энергии завершился, электроды сплавляются расплавленным веществом. Это, как правило, происходит, если размер промежутка между электродами незначителен. При энергии импульса, малой для вытаскивания большого объема вещества с

электродов либо в случае, когда к моменту замыкания электродов импульс уже завершился, основа затвердевает в промежутке между электродами, и электроды в некоторых случаях совмещаются друг с другом электропроводным мостиком.

Когда последующий импульс имеет достаточно количество энергии, то замыкавший электроды проводящий мостик, расплавляется и испаряется теплотой, выделяющейся в нем в результате прохождения электрического тока. Межэлектродный промежуток высвобождается от затвердевшего в нем вещества, и процесс продолжает развитие так, как было описано ранее.

3. Ко времени прохождения импульса, электроды соприкасаются друг с другом, и тепла, выделяющегося при огромной площади контакта, оказывается немного для расплавления вещества в области контакта; протекает только лишь нагрев вещества электрода. При существенной мощности импульсов тока допустимо соединение электродов.

В случае если в рассмотренном случае имеют контакт только лишь микровыступы в незначительных местах, то в таком случае вероятно их расплавление из-за теплоты, выделяющейся на участке соприкосновения микровыступов, т.е. от прохождения через них импульсов электрического тока. Когда контакт нарушается, появляется разрядный канал, уже, после чего явление электроэрозии формируются в соответствии с нормой.

Среднее расстояние между электродами находится в зависимости от силы разрядов и величины напряжения. Это объясняется тем, что чем большей энергией обладает разряд, тем большее количество вещества выплавляется, и промежуток между электродами становится более насыщенным изолировавшимися от электродов частичками и продуктами распада РЖ. То же самое совершается и при диспергировании веществ с

небольшой температурой плавления, что оказывать содействие ускорению течения ЭЭД.

Таким образом, равно как в формировании течения ЭЭД лежат тепловые процессы влияния на измельчаемое вещество, то скорость электрической эрозии и вид механизма эвакуации станут находиться в зависимости от теплофизических характеристик процесса, а кроме того от длительности и многих других условий.

Устойчивость используемых материалов к электро эрозии обычно оценивают при помощи так называемого критерия Палатника. Данный критерий пропорционален времени расплавления некоторого объема используемого материала:

$$\Pi = c \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot T_{\Pi}^2, \quad (2.5)$$

где, c – теплоемкость;

γ – удельный вес;

λ – коэффициент теплопроводности;

T_{Π} – приведенная температура плавления.

Так как критерий соразмерен времени, то в таком случае он показывает, как тот или иной из использованных материалов, пребывающих в схожих обстоятельствах, ранее либо позднее разогревается вплоть до температуры плавления. Приняв то, что разрушение сплава совершается во время расплавления, то формулу специально ввели коэффициент, который именуют приведенной температурой плавления для того, чтобы учитывать скрытую теплоту плавления. Критерий Π стали считать физическим коэффициентом стойкости. Таким образом установили, прямую зависимость

между критерием П количеством энергии, которую следует затратить в эрозию единицы массы используемого материала.

Но множественные исследования демонстрируют, то что между критерием Палатника и эрозионной стойкостью использованного материала никак не прослеживается жесткой функциональной связи. Это в главную очередь сопряжено с тем, что вычисление критерия Палатника обуславливается по неподвижным теплофизическим характеристикам использованного материала, а процедура электроэрозионного диспергирования совершается в неравновесных обстоятельствах, при которых теплофизические характеристики получают значения, несхожие от неподвижных [32].

Описанный процесс ЭЭД представлен ниже (рисунок 2.4). Импульсное напряжение генератора импульсов 1 прикладывается к электродам 2 и 3 и далее к пластинам из отходов шарикоподшипниковой стали 6 (в качестве электродов также служат отходы шарикоподшипниковой стали). При достижении напряжения установленной величины происходит пробой РЖ 5, которая находится в межэлектродном пространстве. Образуется канал разряд 7. Вследствие высокой концентрации термической энергии используемый материал в точке разряда 8 плавится и испаряется, РЖ так же испаряется и охватывает чего происходит значительное развитие динамических сил в газовом пузыре и канале разряда, капли жидкого вещества 4 извергаются в РЖ, которая окружает электроды. В ней происходит застывание с образованием сферических или эллиптических крупиц порошкового материала из отходов ШХ15.

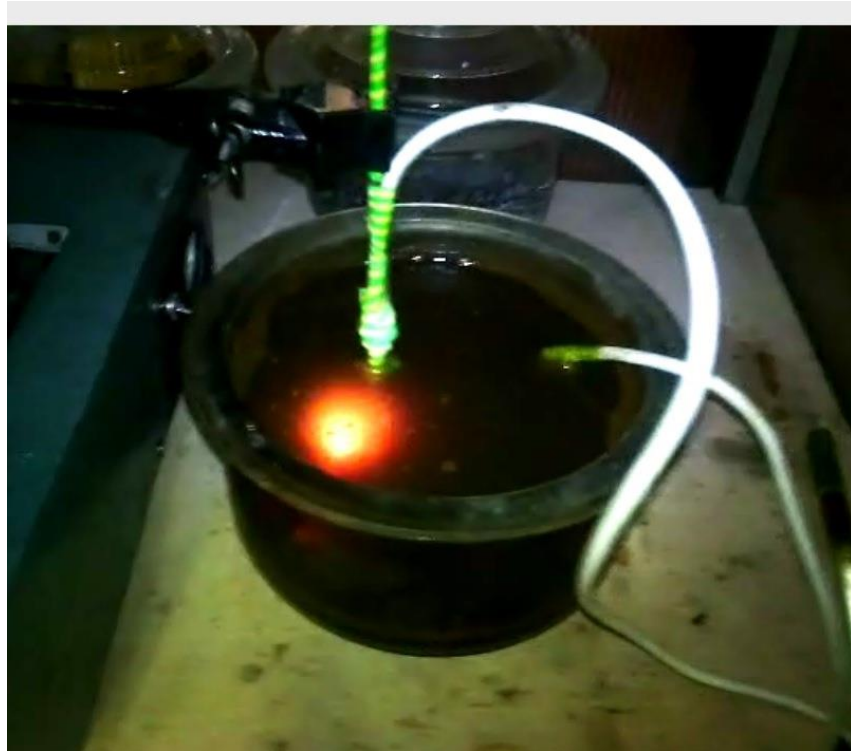


Рисунок 2.4 – Фотография процесса ЭЭД

2.3 Обзор существующего оборудования для получения порошковых материалов методом ЭЭД

С целью практического исполнения процесса ЭЭД посредством МЭП должны проходить импульсы тока с конкретной амплитудой и частотой, поделенные промежутками.

Термический эффект, формируемый неподвижной дугой, для процесса ЭЭД не подходит, по причине того, что совершается расплавление крупных размеров использованного материала. По этой причине значимым обстоятельством стандартного хода процесса ЭЭД считается потребность устойчивого поддержания импульсного тока и предотвращение перехода импульсных разрядов в электрическую дугу.

Схемы преобразователей для питания импульсных установок можно поделить в 2 категории: схемы, в которых импульс тока создается за счет прерывания тока изначального источника питания и схемы с заблаговременным накапливанием электрической энергии и импульсной её отдачи в нагрузку.

К 1 группе принадлежат преобразователи, в которых в качестве переключающих компонентов применяются магнитные усилители либо тиристоры, как, к примеру, в схемах, произведенных на базе одно- либо многофазных управляемых выпрямителей [35, 37, 58].

Главными минусами подобных схем являются осуществление в нагрузке импульсных мощностей, никак не превышающих сила питающей сети, и прямое включение нагрузки в цепи питающей сети.

Простейшими преобразователями с разобшением цепей заряда и разряда являются так называемые релаксационные генераторы, которые широко применяются для питания станков электроэрозионной обработки (ЭЭО) металлов [54, 55]. Их недостатками являются малая мощность и невозможность работы на нагрузки, не обладающие свойством включать ток скачком. Для уменьшения этих недостатков в схемах применяют управляемые коммутаторы, например, тиристоры [66]. На рисунке 2.5 приведена схема такого преобразователя с дросселем, ограничивающим ток заряда конденсатора. Такие схемы применяются для электропитания силовых импульсных установок различного назначения, в частности, для установок диспергирования металлов искровыми разрядами в слое гранул [67].

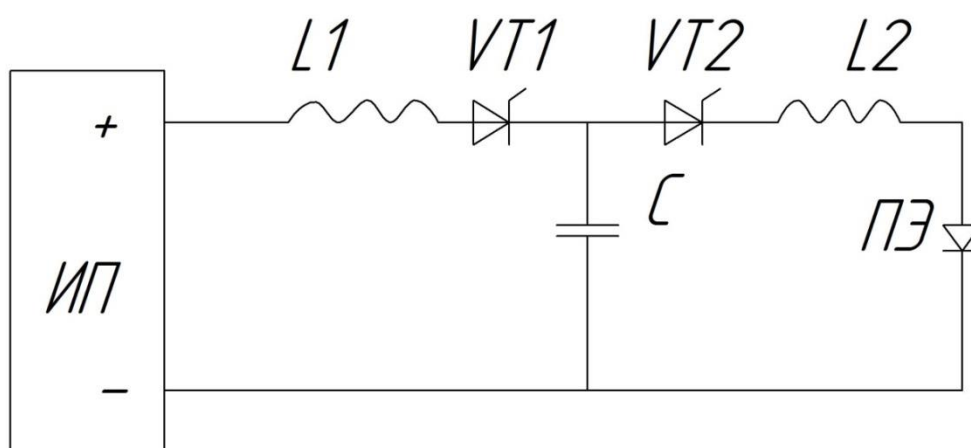


Рисунок 2.5 – Схема преобразователя с дросселем

С целью повышения выходной мощности, частоты разрядных импульсов и стабильности потребляемой от сети мощности используют многоканальные схемы. Они представляют собой параллельное включение на одну нагрузку нескольких зарядно-разрядных контуров, использующих один зарядный дроссель. Питание схемы осуществляется от источника постоянного напряжения. Резонансный заряд накопительного конденсатора осуществляется через линейный высокодобротный дроссель, чем достигается удвоение напряжения на емкости и естественная коммутация зарядного тиристора. Разряд конденсатора происходит при включении разрядного тиристора. Для дополнительного формирования импульса разрядного тока в разрядном контуре иногда включают дополнительный дроссель. По аналогичной схеме построены промышленные преобразователи НКИ-250 и ИГ-1 для размерной ЗЭО металлов [65].

При помощи специальных устройств – генераторов импульсов – создаются электроэнергетические импульсы, которые подаются в промежуток между электродами.

Установка, преобразующая непостоянный электроток промышленной частоты и создающая импульсы установленной амплитуды,

продолжительности и частоты следования [68–71] называется генератором импульсов.

ГИ обязаны соответствовать конкретным условиям: обладать значительным КПД, сберечь в процессе ЭЭД принятый режим диспергирования, т.е. быть стабильными в работе и удовлетворять научно-техническим требованиям ЭЭД.

В научно-технической линии ОЭЭД металлов можно выделить три составных части, где происходит преобразование параметров электрической энергии и ее потребление: собственно тиристорный преобразователь (источник питания искровыми разрядами (ИПИР)), технологический аппарат диспергирования (ТАД) и система управления режимами (СУР) ИПИР и ТАД (рисунок 2.6).

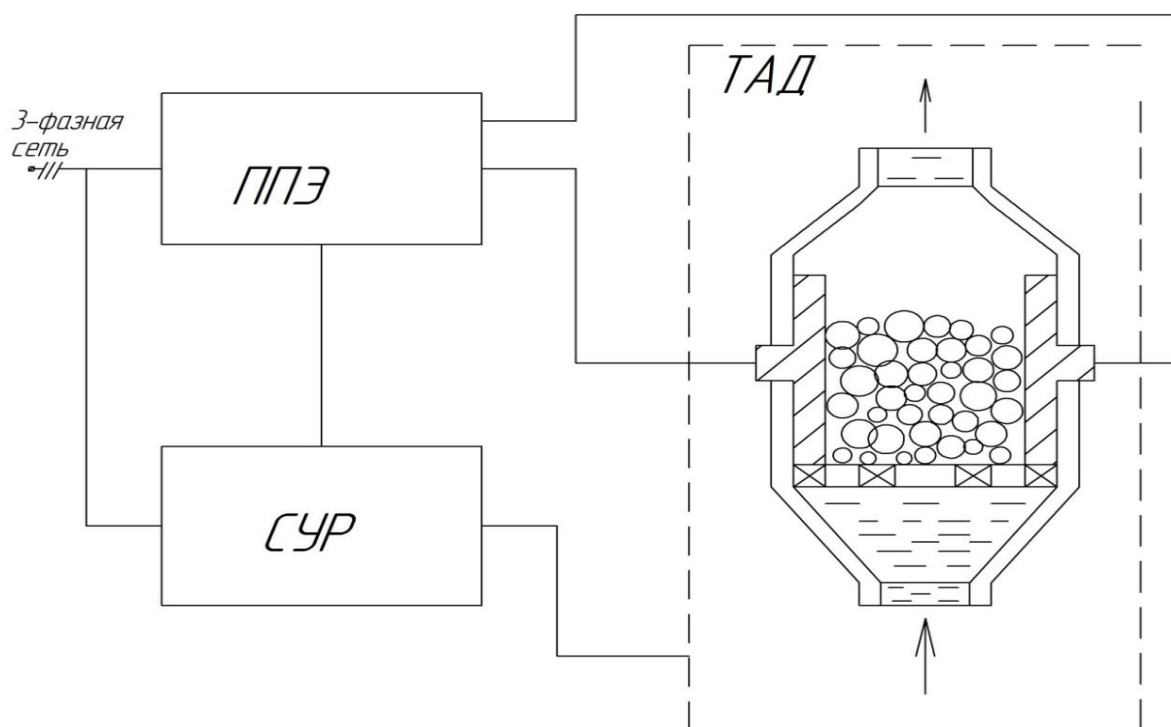


Рисунок 2.6 – Технологическая линия ОЭЭД металлов

Соприкасаясь, гранулы слоя образуют множество электрических контактов, соединенных в межэлектродном промежутке (МЭП)

последовательно-параллельно. Для реализации высокой производительности и малых потерь энергии электропитание ТАД необходимо осуществлять так, чтобы процессы электроэрозии происходили одновременно на возможно большем количестве контактов. Потери подводимой электроэнергии пропорциональны количеству контактов, по которым ток проходит, но эрозии не вызывает. В литературе по ЗЭО [65] отмечено, что на электрических контактах падает приблизительно одинаковое напряжение, равное нескольким десяткам вольт. При ОЭЭД в слое необходимо увеличить по сравнению с разрядом на один контакт разрядный ток и импульсное напряжение. Причем коэффициент увеличения по току определяется количеством возможных, а по напряжению - количеством контактов, соединенных последовательно в одной цепочке. Импульсные мощности электропитания ТАД следует увеличивать пропорционально числу контактов в слое гранул, одновременно подвергающихся эрозии.

Электропитание промышленных ТАД в настоящее время осуществляют импульсами напряжением до 1000 В. При таких напряжениях и требуемых для искрового диспергирования скоростях подвода электрической энергии в рабочем контуре промышленных установок возникают токи амплитудой до 6 кА и скоростями нарастания - до 400 А/мкс. Энергетически целесообразно запитывать ТАД высокочастотными разрядными импульсами, что позволяет реализовать большую среднюю мощность электроэнергопотребления в слое, а значит и высокую производительность порошкообразования [72].

Проведенные в ИЭД АН УССР исследования выявили зависимость характера разрядов в слое токопроводящих гранул от напряжения зарядки рабочих конденсаторов: при повышении такого напряжения разряд становится более колебательным. Поэтому в схемах преобразователей

целесообразно ввести отрицательную обратную связь напряжения зарядки с величиной остаточного напряжения на конденсаторе при его предыдущем разряде. Индуктивность разрядного контура целесообразно выбирать такой, чтобы перезаряд конденсатора был до напряжений, составляющих не более 30% от величины напряжения заряда. При таких требованиях расчетный КПД разрядной цепи может превышать 90%.

На рисунке 2.7 приведена схема тиристорного параметрического преобразователя, используемого на практике для электропитания технологических аппаратов ОЭЭД мощностью до 30 кВА [67, 73]. В схеме используется резонансный заряд рабочего конденсатора C от формирователя постоянного напряжения ФПН через высокодобротный дроссель $L1$ и затем разряд конденсатора на нагрузку. Введение в схему перезарядной цепочки, состоящей из высокодобротного дросселя $L3$ и неуправляемого вентиля D , позволяет осуществлять параметрическую зависимость напряжения питания ТАД от характера разрядов в слое гранул. Для реализации такой зависимости рабочий конденсатор должен разряжаться в колебательном режиме, что достигается соответствующим выбором параметров разрядного контура (емкости C конденсаторов, конструктивной индуктивности $L2$ контура и его активного сопротивления). Схема устойчива к возникновению в нагрузке стохастических коротких замыканий, при этом потребление мощности от сети будет равным суммарной мощности потерь на активных сопротивлениях зарядной, разрядной и перезарядной цепей конденсатора. Дроссели $L1$ и $L3$ могут быть совмещены, как предложено в [74].

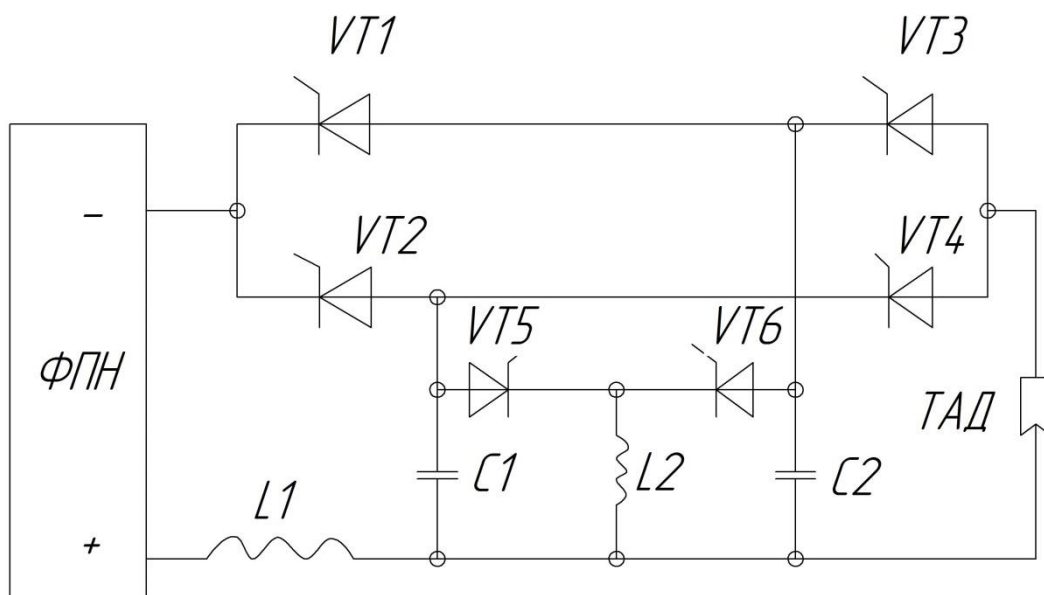


Рисунок 2.7 – Схема тиристорного параметрического преобразователя для электропитания технологических аппаратов ОЭЭД мощностью до 30 кВА

Многоканальные преобразователи типа МПИР позволяют обеспечивать питание нескольких пар электродов в одном ТАД, что повышает стабильность ОЭЭД в слое [72]. При двух парах электродов наиболее эффективно осуществлять разряды в слое во взаимно ортогональных направлениях. В многоканальных преобразователях возможно повышение надежности работы за счет устойчивости к режимам холостых разрядов в ТАД посредством принудительного выключения, при необходимости, разрядных тиристорных ключей. Но при таком построении тиристорные разрядные ключи необходимо выбирать с повышенными классами по напряжению и его скорости нарастания [75, 76].

При питании от промышленной сети переменного тока ФПН представляет собой выпрямитель (В) с буферным накопителем энергии (БНЭ) в цепи выпрямленного тока и частотными фильтрами (ЧФ) в цепи переменного тока. БНЭ обычно выполняются на базе конденсаторов, емкость которых выбирается более чем на порядок большей, чем емкость рабочих

конденсаторов. В состав ФИН входит зарядное устройство (ЗУ), емкостной накопитель энергии (ЕНЭ) и формирователь разрядных импульсов (ФРИ). ЗУ выполняется на основе высокодобротного дросселя и тиристорных коммутаторов. ФРИ включают в себя тиристорные разрядные коммутаторы, цепочки отрицательной ОС по напряжению, разрядный токопровод и возможные дополнительные цепочки формирования формы разрядных импульсов и принудительной коммутации разрядных тиристоров. Цепочка ОС выполняется на базе высокодобротного дросселя и полупроводникового вентиля (управляемого или неуправляемого). СУР выполняется обычно на микросхемах средней степени интеграции и предназначается для управления тиристорными коммутаторами ЗУ, ФРИ и блоками автоматики ТАД. С помощью приведенных схем в нагрузке возможно также реализация и разнополярных импульсов, если параллельно разрядному тиристорному подсоединить обычный диод и индуктивность контура выбрать такой, чтобы разряд был колебательным или, если нагрузки включать в цепочки, общие для зарядных и разрядных контуров.

Особенностью жаропрочных материалов и сплавов (по сравнению с чистым алюминием) является то, что они имеют более высокие значения плотности, удельного электрического сопротивления, температуры и удельной энергии плавления и испарения. Поэтому поиск режимов стабильного искрового диспергирования в слое жаропрочных материалов (по сравнению с известными из литературы) [67, 72, 73, 75] целесообразно вести в направлении уменьшения внутреннего сопротивления преобразователя, индуктивности разрядного контура, высоты слоя, размеров исходных гранул, ширины электродов, а также увеличения энергии разрядного импульса, скорости ее подвода и интенсивности протока рабочей жидкости.

Если использовать полностью контролируемые электронные или полупроводниковые устройства в виде устройств коммутации, то появляется возможность создавать импульсы широчайшем диапазоне по продолжительности, частоте повторений, а также со скважностью, которую можно варьировать в широком диапазоне. Эти устройства будут иметь отличия только по типу используемого прибора: для создания импульсов с большой скважностью нужно устанавливать импульсные лампы и тиристоры, для создания импульсов с малой скважностью нужно применять простые генераторные лампы и мощные транзисторы.

В настоящее время весьма перспективным направлением является применение мощных транзисторов для создания энергетических импульсов, но это сводится к тому, что на данный момент времени отсутствуют весьма мощные транзисторы с нужными характеристиками.

Главными минусами подобных генераторов считаются следующие: импульсная мощность, не может превышать мощность питающей сети; нельзя включить нагрузку напрямую в цепь питающей сети [65].

Установка для проведения процесса ЭЭД имеет в своем составе генератор импульсов, создающий импульсы установленной амплитуды, продолжительности и частоты следования, и реактор, в котором напрямую и совершается процесс диспергирования отходов электрической эрозией.

Первые упоминания о появлении установки для диспергирования отходов электрической эрозией относятся к 1943 г. [76]. В её состав входил наполненный жидкостью сосуд. В жидкости на параллельных валах вращались два диска: катод и анод. В пространстве между торцами вращающихся дисков происходят искровые разряды, которые и приводят к эрозии токопроводящего вещества. По мере износа дисков, система автоматически удерживала необходимый постоянный зазор. Разряд генерируется колебательным контуром, настраивают который подбором

определенных величин электрических параметров. Но для процесса ЭЭД долгое время использовались электроэрозионные станки, невзирая на существование вышеупомянутой установки. Именно по этой причине в 1972 г. ученые из института неорганической и физической химии АН Киргизской ССР предложили свой вариант установки [77]. Катод и анод в этой установке были вывешены на шарнирах таким образом, чтобы под действием силы тяжести опираться на, находящийся между ними, промежуточный круг. При вращении этого диска происходит отрыв подвешенных над ним электродов, что и создает искровые промежутки. В этих промежутках происходит разряд, разрушающий электроды.

Отмеченные устройства, наравне с электроэрозионными станками, обладали значительный недостаток – диспергируемый используемый материал обязан был иметь конкретную геометрическую фигуру, и его всегда следовало фиксировать.

В 1971 г. ученые из Японии спроектировали и запустили в работу установку ЭЭД. С её помощью они начали получать гидроксид алюминия. Конструкция их устройства имела следующие компоненты: сосуд из материала диэлектрика, в который залита дистиллированная вода и два электрода, погруженных в этот сосуд [78]. Затем насыпают небольшие кусочки алюминия размером 10 – 20 мм. После этого, импульсы высокого напряжения от ГИ, подают на алюминиевые электроды, мелкие обрезки алюминия замыкают электрическую цепь.

Разработанная японскими учеными установка, позволяла производить процесс ЭЭД кусочков сыпного материала. Большая часть последующих исследований и патентов посвящено вариации данной установки. Но были в ней и недостатки.

Главным дефектом данного устройства являлось то, что под воздействием ударов обрезки алюминия утрамбовывались, слипались в единую массу, и разряды самостоятельно прерывались. Вышеупомянутый недостаток был устранен на установке, созданной в СССР, [79]. В её конструкцию подавали поток жидкости через сетчатое днище. Этот поток «вспенивал» кусочки диспергируемого сплава и заодно с этим смывал продукты эрозии. В эту систему входили различного вида ёмкости, в которых порошок отстаивался, а также центрифуга или пресс-фильтр [80].

Ещё одним методом удерживания зазоров между кусочками диспергируемого металла, который применяли в установке [52], было встряхивание сосуда, в котором происходил процесс ЭЭД.

У отмеченных установок, способ подведения электрических импульсов через электроды, находящиеся по окраинам резервуара, был не без изъяна. Эти электроды обязаны состоять из вещества, никак не загрязняющего порошковый материал, и иметь конкретную конфигурацию. Они моментально изнашиваются и требуют слишком частой замены. В начале 80-х годов предложили приспособление для ЭЭД, в котором электрические разряды возбуждаются посредством влияния на кусочки диспергируемого использованного материала электромагнитным полем [81]. Импульсы генерируются одновитковым индуктором, подсоединенным к источнику тока производящему импульсы тока. Данная установка никак не приобрела последующего продолжения.

2.4 Экспериментальная установка ЭЭД

На основании проведенного анализа установок для реализации процесса ЭЭД была разработана опытный образец установки

электроэрозионного диспергирования (рисунок 2.8), состоящая из регулятора напряжения, генератора импульсов, встряхивателя электродов и реактора.

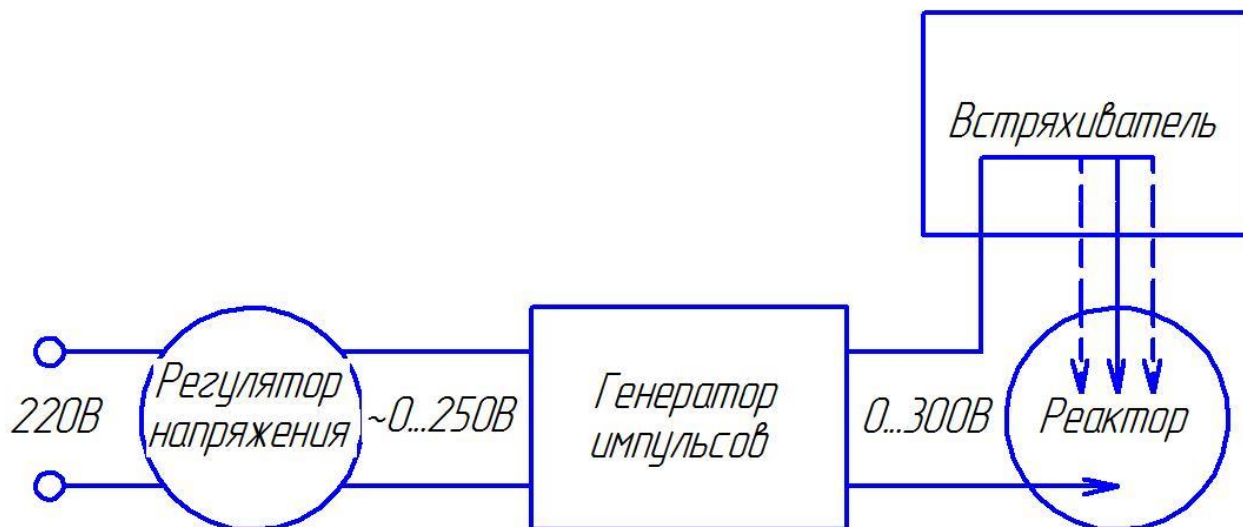


Рисунок 2.8 – Структурная схема установки ЭЭД

Для регулировки напряжения установки служит устройство, регулирующее величину входного напряжения. В качестве такого устройства для установки ЭЭД был использован регулятор напряжения однофазный РНО–250–10 ТУ 16.-517.298–70 (рисунок 2.9) с интервалом регулирования выходного напряжения от 0 до 250 В, силой тока до 40 А и максимальной мощностью 10 кВт.



Рисунок 2.9 – Регулятор напряжения однофазный

Внешний вид, внутренний вид и структурная схема генератора импульсов представлены ниже (рисунок 2.10). Генератор импульсов собран по однозвенной схеме с резонансным зарядом рабочего ёмкостного накопителя от источника постоянного напряжения. Данный генератор импульсов имеет в своём составе блок управления и силовой блок.

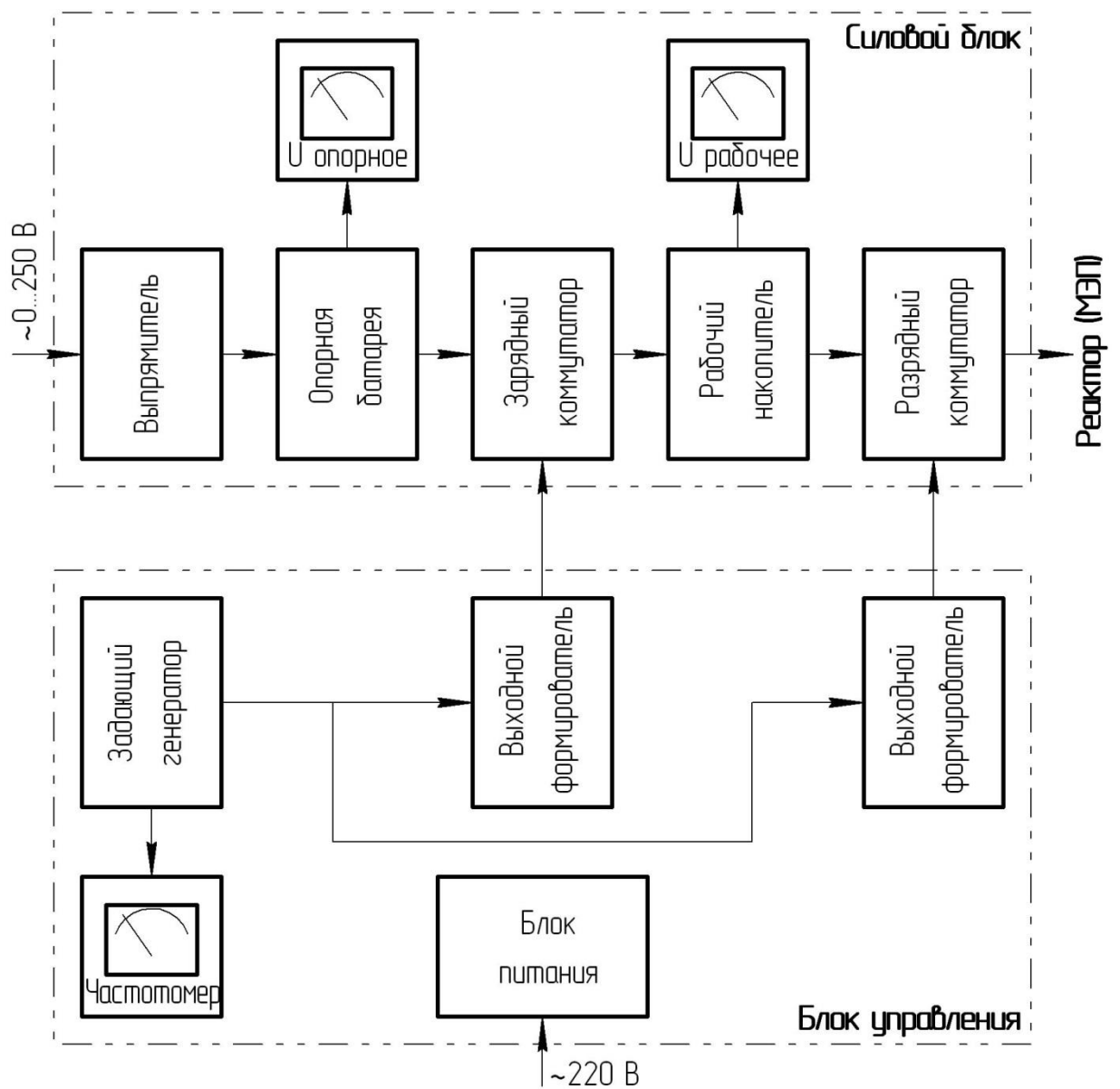


Рисунок 2.10 – Структурная схема ГИ установки ЭЭД

Силовой блок состоит (рисунок 2.11):

- однофазный выпрямитель, который преобразует переменное напряжение 0–250 В в постоянное;
- опорная батарея конденсаторов, которая фильтрует выпрямленное напряжение;

– зарядный тиристорный коммутатор, который обеспечивает резонансный заряд рабочего накопителя и отключение его от опорной батареи конденсаторов на время формирования нового импульса разрядного тока;

– рабочий накопитель, который накапливает электрическую энергию и отдаёт её в нагрузку;

– разрядный тиристорный коммутатор, который подключает заряженный рабочий накопитель к нагрузке и так же исключает влияние режимов разряда на режимы потребления электрической энергии от питающей сети.

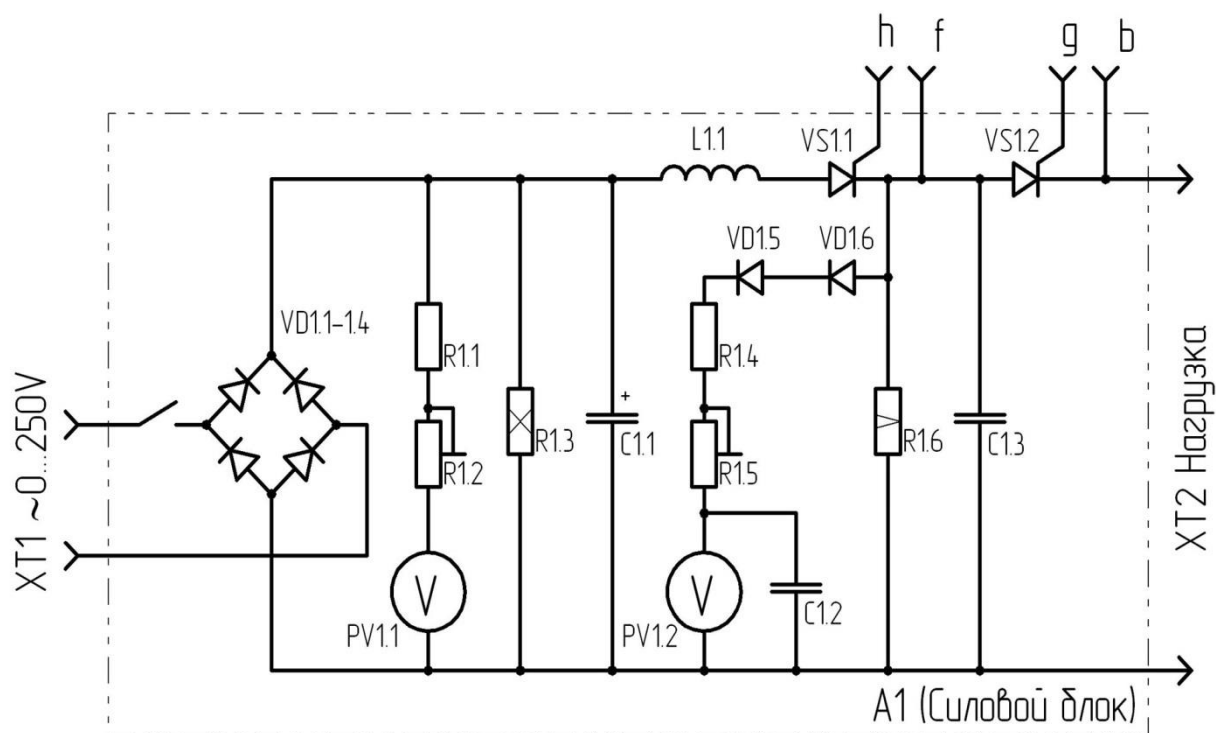


Рисунок 2.11 – Силовой блок ГИ установки ЭЭД.

Принципиальная электрическая схема

Чтобы контролировать режимы работы силового блока в конструкции предусмотрен вольтметр амплитудных значений ($U_{\text{рабочее}}$), который отображает наибольшее напряжение на рабочем накопителе.

Блок управления данного генератора импульсов выдаёт сигналы управления коммутаторами заряда и разряда, определяет и показывает рабочую частоту ГИ, так же в процессе работы и настройки меняет режимы. В его состав включены следующие компоненты: задающий генератор (рисунок 2.11), выполненный на основе управляемого мультивибратора, с регулятором и индикатором рабочей частоты (рисунок 2.12); выходные формирователи сигналов управления зарядным и разрядным коммутаторами и блок питания (рисунок 2.12), который дает возможность работать блоку управления.

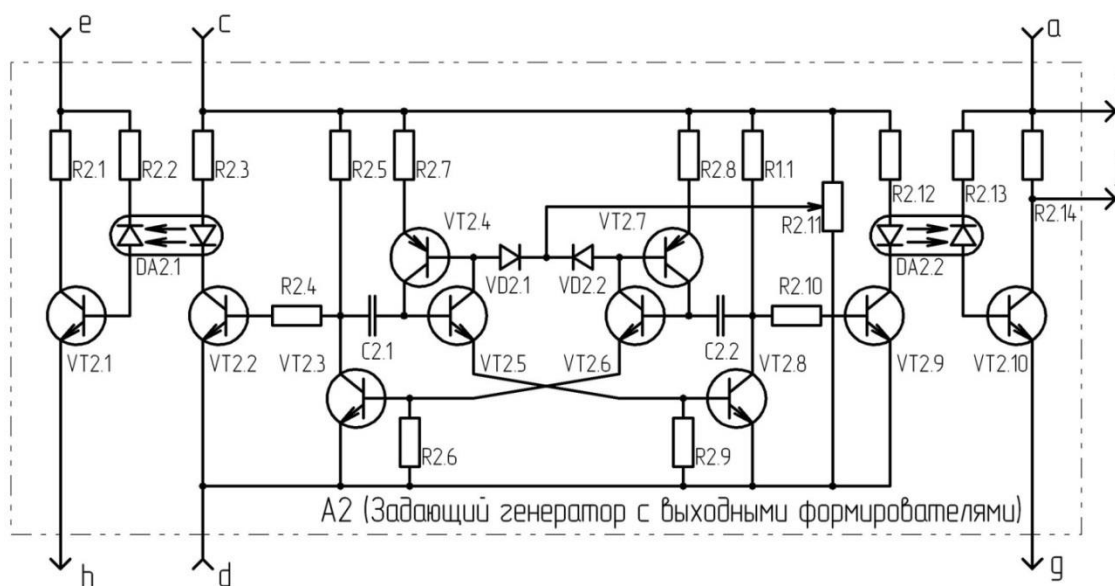


Рисунок 2.12 – Задающий генератор с выходными формирователями блока управления ГИ установки ЭЭД. Принципиальная электрическая схема

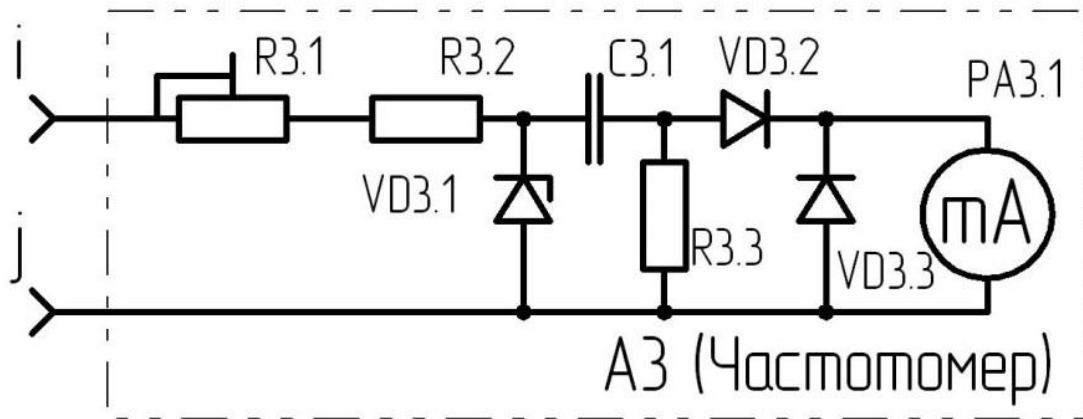


Рисунок 2.13 – Частотомер блока управления ГИ установки ЭЭД.
Принципиальная электрическая схема

Генератор импульсов данной установки ЭЭД работает по следующему принципу. Задающий генератор формирует импульсы в форме прямоугольника. Их частота регулируется и отображается на индикаторе рабочей частоты. Затем эти импульсы создают импульсы для управления коммутаторами заряда и разряда. На выходные формирователи поступают сформированные импульсы, которые осуществляют сигналы управления коммутаторами заряда и разряда заданной частоты и амплитуды.

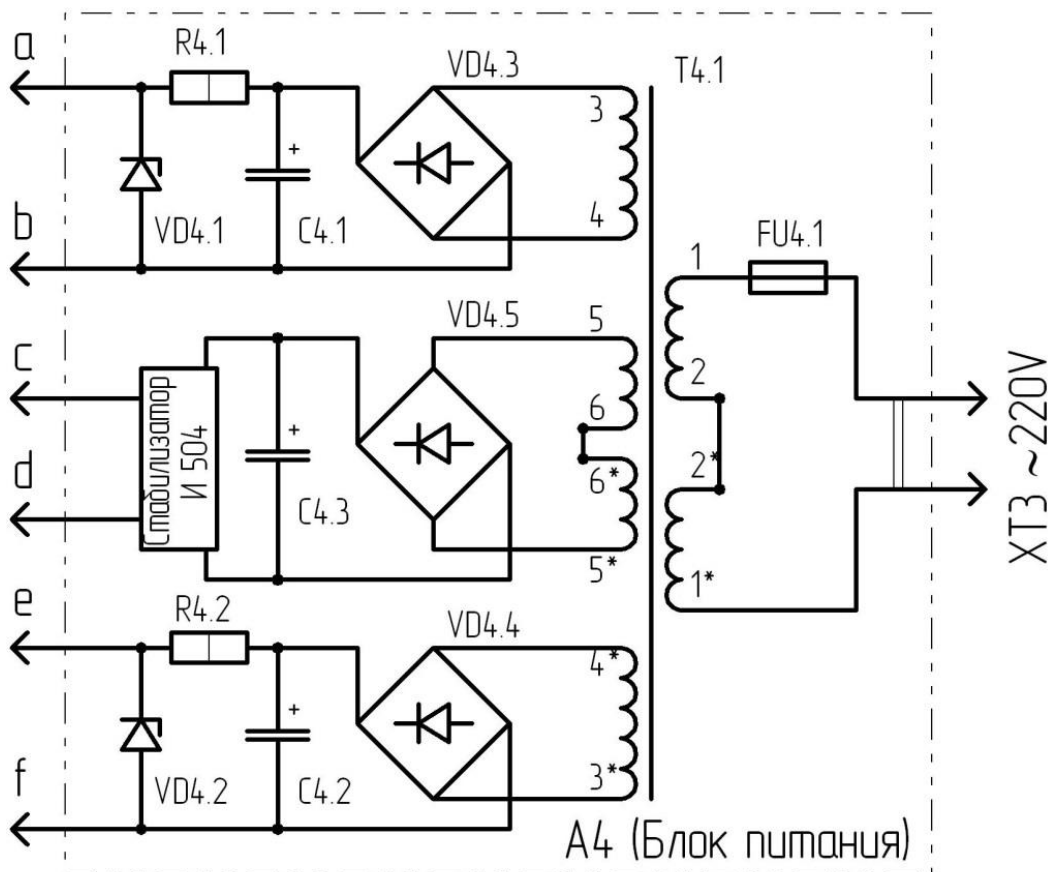


Рисунок 2.14 – Блок питания блока управления ГИ установки ЭЭД.

Принципиальная электрическая схема

Задающий генератор определяет частоту, которая под воздействием сигналов управления зарядным и разрядным коммутаторами периодически включает и выключает их.

Процесс ЭЭД проводили по схеме, представленной на рисунке 2.15

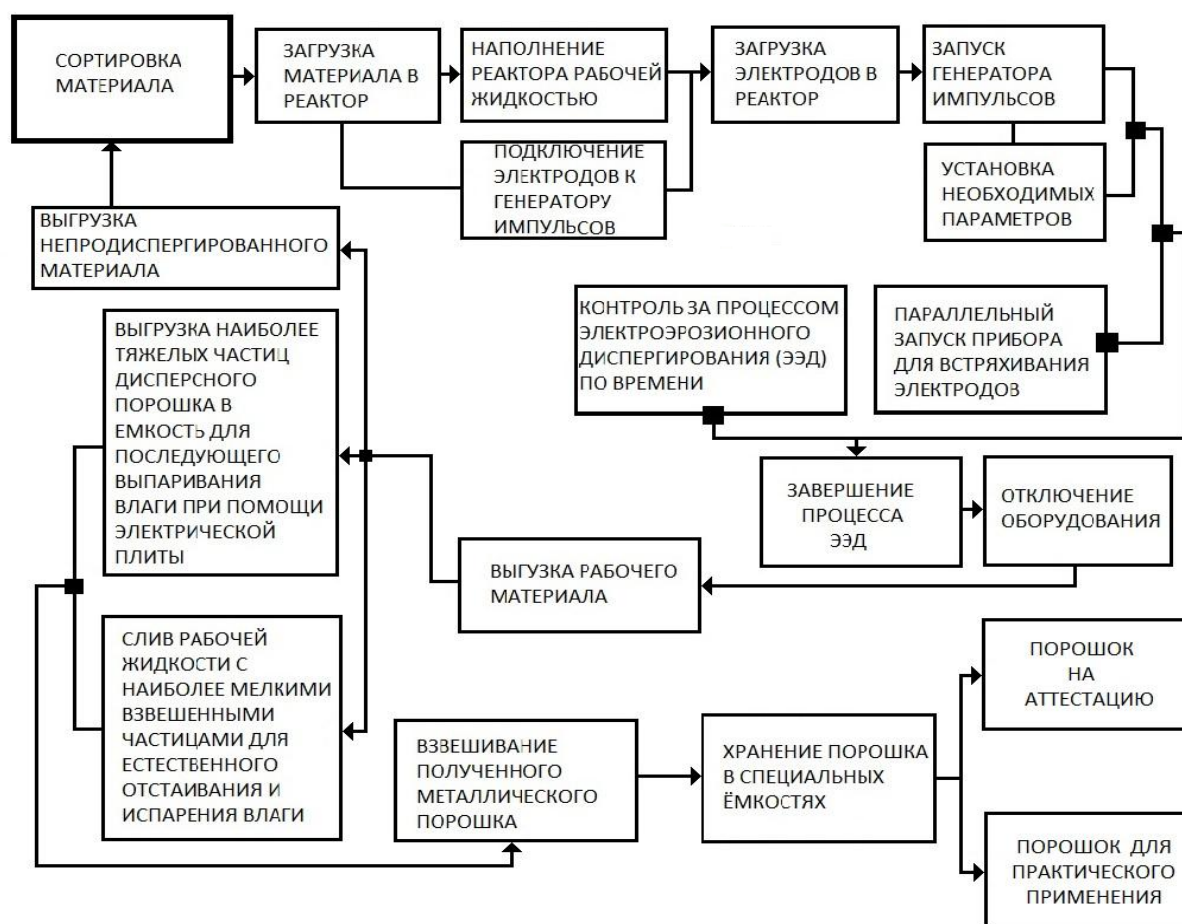


Рисунок 2.15 – Схема процесса электроэрозионного диспергирования

Процесс получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 методом ЭЭД, включает следующие основные операции:

1. Сбор отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15.
2. Очистка отходов (от загрязнений, стружки).
3. Загрузка отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 в реактор и подключение электродов к генератору импульсов.
4. Заполнение реактора рабочей жидкостью.
5. Подбор режимов диспергирования.
6. Процесс ЭЭД.

7. Отстаивание и сливание РЖ.
8. Выпаривание влаги с помощью электроплиты.
9. Контроль качества полученного порошкового материала.

2.5 Рабочие жидкости для получения порошковых материалов методом ЭЭД

Процессы, которые совершаются при электроэрозионном диспергировании проходят в межэлектродном пространстве, наполненном рабочей жидкостью, что, будучи в рабочей области, проявляет на процесс, электроды, куски диспергируемого вещества и продукты эрозии физическое, химическое, моющее и механическое влияние. Это воздействие отражается на абсолютно всех стадиях хода ЭЭД.

В первоначальный период образования пробоя МЭП сказываются вязкость РЖ и её диэлектрическая стойкость. Вязкость создает период времени, который нужен с целью создания токопроводных крупниц в «мостик», согласно которой происходит пробой РЖ.

Во время испарения с поверхности электродов, химические элементы РЖ вступают в соединения с оксидными плёнками, которые покрывают электроды, и происходит образование абсолютно новых химических соединений. В это же время начинается образование защитных пленок на поверхностях электродов. Физико-химические свойства рабочей жидкости определяют протекание всех вышеописанных процессов.

На следующем этапе, особую значимость приобретает вязкость РЖ, когда наступает момент удаления повышением вязкости степень присвоения продуктов эрозии повышается, и процедура их удаления становится лучше.

Перемещение вязкой РЖ затруднено, когда промежуток между электродами невелик, и процесс удаления становится хуже.

Так же с помощью РЖ охлаждается рабочая зона, предотвращается оплавление поверхностей электродов и частей диспергируемого вещества.

Принимая во внимание вышеупомянутое, можно сделать вывод о том, что РЖ обязана удовлетворять следующим главным условиям:

- обеспечивать высокие технологические показатели ЭЭД, термическую стабильность физико-химических свойств при воздействии электрических разрядов с параметрами, соответствующими применяемым при ЭЭД;

- иметь низкую коррозионную активность к диспергируемым материалам;

- иметь высокую электрическую прочность;

- иметь высокую температуру вспышки и низкую испаряемость;

- обладать хорошей фильтруемостью;

- не иметь запаха и быть не токсичной;

- иметь высокую охлаждающую способность и обладать низкой стоимостью.

Температура вспышки паров рабочей жидкости (согласно строительным нормам СНиП II-M2-72 для производства категории 2) не должна превышать 61°C.

Вид и состояние рабочей жидкости оказывают большое влияние на технологические показатели процесса ЭЭД. Наибольшее применение при ЭЭД получили углеводородные жидкости различной вязкости, которые представляют собой сложные соединения, включающие различные углеводороды, асфальтосмолистые вещества, сернистые соединения и кислоты.

Из перечисленных выше главных требований следует, что углеводородные жидкости должны иметь как можно меньше сернистых соединений из-за того, что они формируют ядовитый газ, органических кислот, так как они раздражают кожу и снижают электрическую прочность РЖ, асфальтосмолистых веществ и ароматических углеводородов, так как они усугубляют фильтруемость, способность к охлаждению и при разложении формируют ядовитые газы.

Помимо углеводородных жидкостей еще применяется дистиллированная вода. В ней формируются коллоидальные растворы и суспензии, совершается разжижение значительного числа разных элементов. Вода дешевле любых углеводородных жидкостей и имеет большую теплоемкость. В редких случаях используют кремнийорганические жидкости, эмульсолы, а также водные растворы двухатомных спиртов.

При протекании через рабочую жидкость электротока, происходит её пиролиз. Из-за него, в итоге, конечными элементами разложения рабочей жидкости являются водород, кислород и углерод. Газ в виде кислорода в ходе диспергирования поднимается на поверхность рабочей жидкости, а углерод взаимодействует с продуктами эрозии.

В зависимости от вида рабочей жидкости в результате диспергирования разных токопроводящих веществ может быть получен как чистый металлешкий порошок материал [82], так и оксиды, и карбиды.

2.6 Выводы к главе 2

1. Обоснована возможность применения метода ЭЭД для получения порошковых материалов из отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15.

2. Проведен обзор существующего оборудования для получения порошковых материалов методом ЭЭД. Установлено, для практического осуществления процесса ЭЭД через МЭП должны проходить импульсы тока с определенной амплитудой и частотой, разделенные интервалами, во время которых ток между электродами отсутствует.

3. Обоснован выбор рабочих жидкостей для получения порошковых материалов методом ЭЭД из отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15.

ГЛАВА 3

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Выбор материалов

Для получения порошковых материалов в качестве диспергируемого материала использовали отходы шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Отходы шарикоподшипниковой стали марки ШХ15

В качестве электродов также использовали отходы из шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Электроды, собранные из отходов стали ШХ15

Химический состав стали ШХ15 представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав стали ШХ15

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu	O
0,95 – 1,05	0,17 – 0,37	0,2 – 0,4	до 0,3	до 0,02	до 0,027	1,3 – 1,65	до 0,01	до 0,25	до 0,0015

В качестве рабочей жидкости использовалась вода дистиллированная по ГОСТ 6709–72 и керосин осветительный ГОСТ 10227-86 [83, 84].

Некоторые свойства дистиллированной воды (ГОСТ 6709–72) и керосина осветительного (ГОСТ 10227-86) и их химический состав представлены ниже (таблица 3.2) [277].

Таблица 3.2 – Химический состав и свойства воды дистиллированной по ГОСТ 6709–72 и керосина осветительного по ГОСТ 10227-86

Рабочая жидкость	Формула (состав)	Молекулярная масса, г/моль	Температура кипения, °С	Вязкость при 25°С, сСт	Плотность при 20°С, кг/м ³
Вода дистиллированная	H ₂ O	18,01	100	0,89	0,998
Керосин осветительный	C _n H _n	Зависит от n	150–250	1,3	0,78

Примечание: n – число атомов

Основными регулируемыми параметрами, экспериментальной установки ЭЭД, напрямую воздействующими на процесс образования **порошкового материала, являются:**

- **напряжение на электродах (U);**
- **частота следования импульсов (f) ;**
- **ёмкость рабочего накопителя (C);**
- **расстояние между электродами (l).**

При проведении опытов по диспергированию отходов шарикоподшипниковой стали периодически изменяли расстояние между электродами в реакторе, варьировали напряжение на электродах от 60 до 180 В, варьировали частоту следования импульсов – от 50 до 180 Гц, меняли ёмкость разрядных конденсаторов – от 35 до 65 мкФ.

3.2 Оборудование для получения порошковых материалов

Для получения порошковых материалов из отходов стали ШХ15 было отдано предпочтение методу электроэрозионного диспергирования (ЭЭД). В качестве оборудования использовалась установка для получения нанодисперсных порошковых материалов из токопроводящих материалов (патент РФ № 2449859), включающая в себя регулятор напряжения, генератор импульсов и реактор [85].

Процесс ЭЭД представлен ниже (рисунок 3.2, 3.3). К электродам 2 и 3 прикладывается импульсное напряжение генератора импульсов 1 и далее к отходам шарикоподшипниковой стали 6 (в качестве электродов также служат отходы шарикоподшипниковой стали). При достижении напряжения установленной величины совершается электрический пробой рабочей жидкости 5, находящейся в пространстве вокруг отходов ШХ15, загруженных в реактор, с образованием канала разряда 7. Диспергируемый металл в точке разряда 8 плавится и испаряется, вследствие высокой концентрации энергии, так же испаряется РЖ. Вследствие внушительных динамических сил, развивающихся в канале разряда и пузыре газа, частицы жидкого используемого материала 4 извергаются за границы области разряда в РЖ, окружающей электроды, и твердеют в ней, создавая круглые либо эллиптические частички порошковых материалов из остатков шарикоподшипниковой стали марки ШХ15.

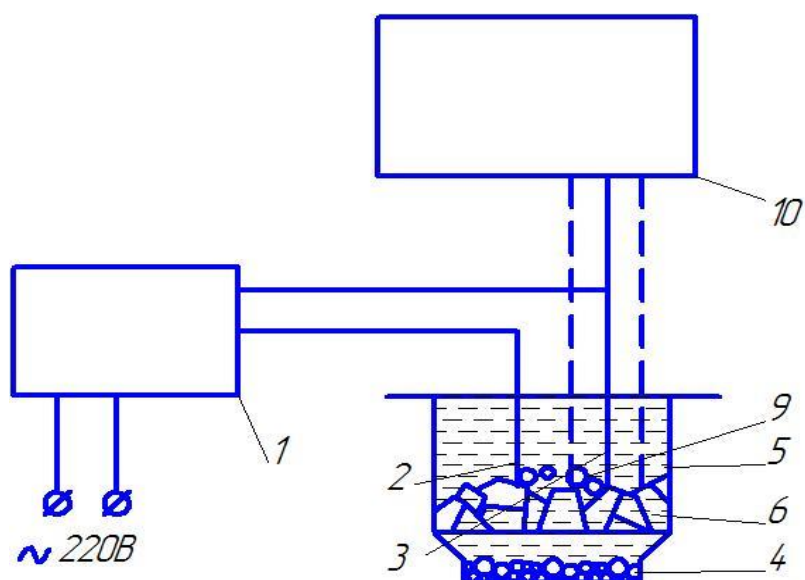


Рисунок 3.2 – Схема установки ЭЭД:

1 – генератор импульсов; 2, 3 – электроды; 4 – капли расплавленного материала; 5 – рабочая жидкость; 6 – отходы шарикоподшипниковой стали; 7 – канал разряда; 8 – точка разряда, 9 – газовый пузырь, 10 – встряхиватель

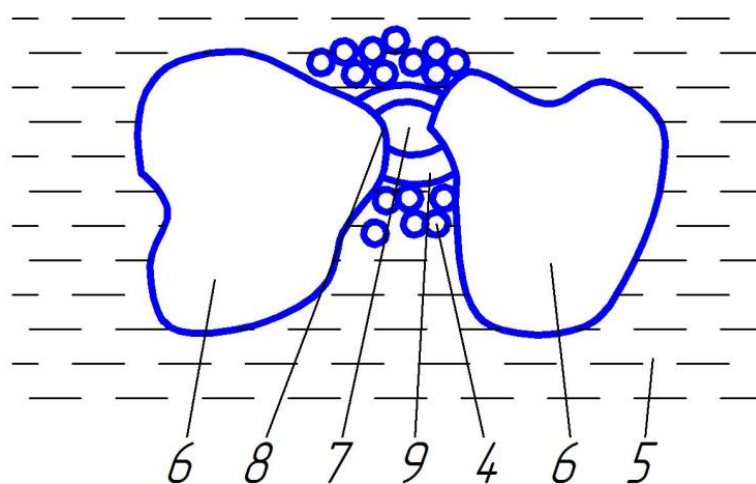


Рисунок 3.3 – Схема процесса ЭЭД

На основании проведенных исследований установок для осуществления процесса ЭЭД была разработана экспериментальная установка ЭЭД, имеющая в своем составе генератор импульсов, регулятор

напряжения, встряхиватель электродов и реактор, заполненный отходами и рабочей жидкостью.

Необходимое переменное напряжение перед генератором импульсов устанавливается с помощью регулятора напряжения. В представленной установке используется однофазный регулятор напряжения РНО–260–10 ТУ 16.-817.298–70, который позволяет регулировать выходное напряжение 0...260 В, а силу тока до 45А и максимальную мощность 12кВт [86]. На рисунке 3.4 представлено изображение регулятора напряжения установки электроэрозионного диспергирования.



Рисунок 3.4 – Внешний вид регулятора напряжения установки ЭЭД

Генератор импульсов (ГИ) – это установка, которая выполняет преобразование переменного тока промышленной частоты, а затем создает импульсы необходимых отклонений, продолжительности и частоты следования. К генератору импульсов предъявляется ряд необходимых условий: большой КПД, сберегать в течении ЭЭД заданный порядок

диспергирования, т.е. устойчивость в работе. Внешний вид генератора импульсов установки электроэрозионного диспергирования представлен на рисунке 3.5, внутренний вид представлен на рисунке 3.6.



Рисунок 3.5 – Внешний вид генератора импульсов установки электроэрозионного диспергирования

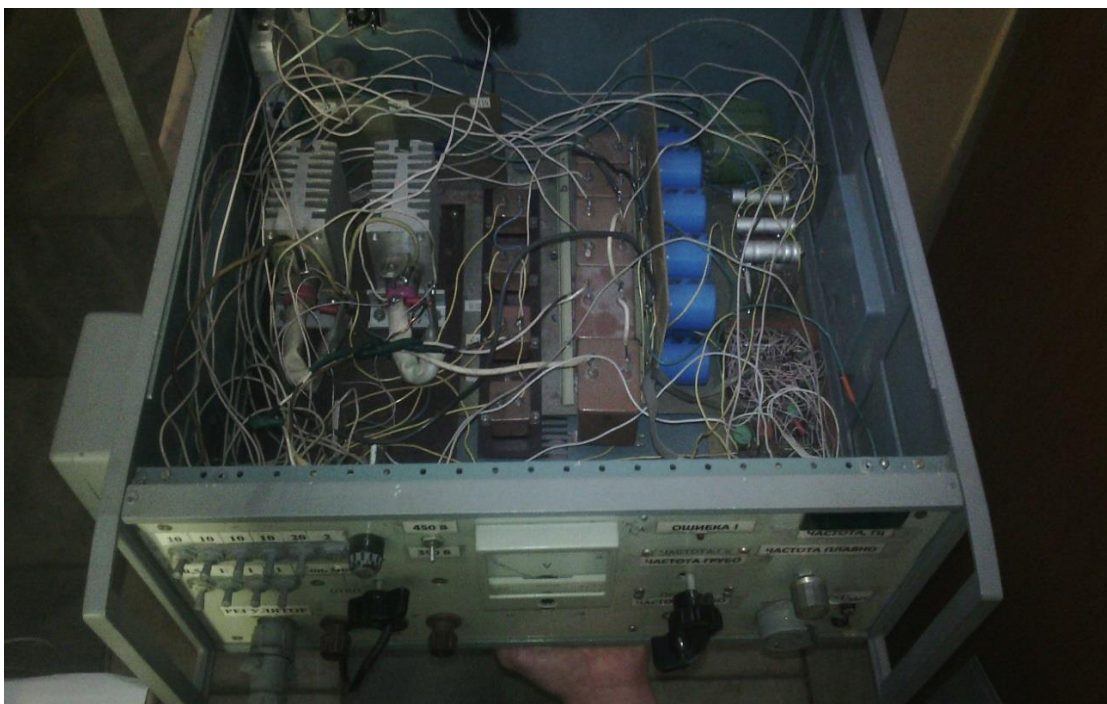


Рисунок 3.6 – Внутренний вид ГИ установки ЭЭД

Отходы шарикоподшипниковой стали загружаются в ёмкость, которая служит реактором. Непосредственно в ней и происходит процесс электроэрозионного диспергирования. С целью увеличения производительности процесса были разработаны различные конструкции реакторов [80, 82, 83]. В качестве ёмкости реактора использовался эксикатор 2–240 ГОСТ 25336–82, который представлен на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Эксикатор 2-240 ГОСТ 25336-82



Рисунок 3.8 – Реактор экспериментальной установки ЭЭД

3.3 Методика исследования гранулометрического состава

Изучение гранулометрического состава порошковых материалов проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22 NanoTec (рисунок 3.9). Порошковые материалы получали способом электроэрозионного диспергирования отходов марки ШХ15.



Рисунок 3.9 – Лазерный анализатор размеров частиц Analysette 22 NanoTec

Лазерный анализатор размеров частиц Analysette 22 NanoTec определяет распределение согласно размерам частиц в суспензиях, эмульсиях и аэрозолях. В сравнении с «классическими» способами измерения – рассевом, седиментацией, либо анализом по изображению – дифракция лазером владеет некоторыми значимыми достоинствами (такими, как малое время анализа, простая калибровка, хорошая воспроизводимость и точность, большой диапазон измерений и высокая универсальность). Диапазон измерений Analysette 22 NanoTec составляет от 0,01 до 2000 мкм.

Физический принцип рассеяния электромагнитных волн используется в тех анализаторах, определяющих распределение частиц по размерам с помощью дифракции лазером. Конструкция такого анализатора имеет в своем составе лазер, который направлен на детектор через измерительную ячейку. Частицы подаются в измерительную ячейку, при помощи диспергирующего устройства, и проходят сквозь лазерный луч. Рассеянный с помощью линзы свет фокусируется на сенсор соразмерно величине частиц. Рассредоточение крупниц согласно их габаритам рассчитывают согласно распределению рассеянного света при поддержке комплексной математики. Вследствие чего получают объемные части, соответствующие равносильным диаметрам при лазерной дифракции. Цифровой ультразвуковой генератор постоянно поддерживает выставленную мощность на постоянном оптимальном уровне. Вследствие этого могут анализироваться даже труднодиспергируемые пробы во встроенной ультразвуковой ванне (объем около 500 мл, энергия и частота ультразвука 80 Вт/36 кГц), без применения дополнительного оборудования. Нижний предел чувствительности при малых количествах мелких и крупных частиц в распределениях их по размерам (в пределах диапазона измерений) – 3%. Воспроизводимость, согласно ISO 13320-1, $d_{50} \leq 1\%$.

Распределение по размерам частичек порошковых материалов осуществляли при помощи лазерного анализатора размеров частиц Analysette 22 NanoТес двумя способами: первый именуется сухим диспергированием, а второй – диспергированием в жидкости с ультразвуком.

Во время процесса сухого диспергирования замер проводили в модуле диспергирования для сухих проб с отсутствием ультразвука. В этом модуле обрабатывают агломераты сухих проб механически и пневматически.

В ходе измерения проба перемещается из удлиненной воронки на лоток вибропитателя сухого диспергирующего устройства. Подвод пробы

выполняется небольшими частями при поддержке уникального, вибрационного лоткового питателя с контролируемой амплитудой. Измельчение выполняется в двухфазном сопле с кольцеобразным проемом, с содействием ювелирных железных пластинок с аэродинамическим образованием волн на выходе сопла и огромной скоростью струи в сопловом канале. При помощи сжатого воздуха, отмеренными дозами, проба поступает в диспергирующую насадку измерительного устройства, в котором проба диспергируется снова с помощью вспомогательного контролируемого потока воздуха и с повышенной скоростью поступает под лучик лазера.

Во время диспергирования в жидкости с ультразвуком применялась последующая технология изучений:

1. Для изучения данных порошковых материалов не понадобилось осуществлять лишнюю подготовку проб.

2. Был подобран наибольший интервал замеров в промежутке от 0,01 до 1021,87 мкм, так как первоначально неизвестна величина крупниц порошковых материалов.

3. Для лазерного луча применили юстирование в автоматическом режиме.

4. Число циклов для автоматической очистки системы находится в исходя их состояния системы и проверки с целью неоднократных изучений.

5. Параметры измерения выбираются оператором в зависимости от свойств исследуемого образца:

- продолжительность измерения: 50 (сканов) – среднее значение;
- мешалка: 70%;
- абсорбция луча: 5%.

6. Фон измеряли для снижения влияния измерительной жидкости, фоновое измерение проводят до всякого нового замера. Каждое новое

засорение от предшествующих замеров замеряется для устранения его воздействия на данный результат.

7. Для измерения распределения частиц по размеру, исследуемый образец объемом около 5 мл заливают в модуль для диспергирования в жидкости (объемом 500 мл). Автоматическая промывка обеспечивается в модуле диспергирования в жидкости. Исследование данного типа порошкового материала проводят с использованием ультразвукового генератора. Как только значение абсорбции достигнет указанной величины, начинается автоматическое измерение.

8. В итоге получают кривые распределения частиц по размеру: дифференциальные, кумулятивные и др., а также форму частицы (коэффициент элонгации: минимальный, средний, максимальный).

3.4 Методика исследований формы и морфологии поверхности частиц

Для выполнения исследований намеченных исследований частиц порошковых материалов, полученных методом ЭЭД из отходов марки ШХ15, были выполнены снимки на растровом электронном микроскопе Nova NanoSEM 450 (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Растровый электронный микроскоп Nova NanoSEM 450

Микроскоп электронный растровый Nova NanoSEM 450, с системами для энергодисперсионного микроанализа, микроанализа с волновой дисперсией и системой анализа дифракции обратно рассеянных электронов, предназначен для измерений линейных размеров элементов микрорельефа, электроннозондового рентгеноспектрального микроанализа, регистрации и анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов.

Микроскоп электронный растровый Nova NanoSEM 450 с системами для энергодисперсионного микроанализа, микроанализа с волновой дисперсией и системой анализа дифракции обратно рассеянных электронов (далее - микроскоп), представляет собой стационарный лабораторный прибор, состоящий из основной консоли, включающей электронно-оптическую колонну, камеру образцов, вакуумную систему, отдельного блока электроники и управляющего компьютера. Микроскоп оснащен высокоточным предметным столиком с пятью осями перемещения с

компьютерным управлением. На портах камеры образцов установлены энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) рентгеновского излучения, спектрометр рентгеновского излучения с волновой дисперсией (ВДС) и система регистрации и анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ). Вакуумная система микроскопа включает безмасляный форвакуумный насос, турбо-молекулярный насос и два ионно-гетерных насоса. Вакуумная система полностью автоматизирована. Система обеспечивает два режима работы – режим высокого вакуума, при котором достигаются наилучшие характеристики пространственного разрешения микроскопа и режим низкого вакуума. В режиме низкого вакуума давление внутри электронной колонны ниже, чем в камере для образцов.

3.5 Методика проведения рентгеноспектрального микроанализа частиц

РСМА выполняли при помощи энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, который встроен в растровый электронный микроскоп Nova NanoSEM 450.

Рентгеноспектральный микроанализ – это определение элементного состава микрообъектов согласно возбуждаемого в них характеристического рентгеновского излучения. В РСМА используют два типа спектрометров для анализа характеристического спектра (бескристалльный либо с кристаллом-анализатором), базой для РСМА служит электронно-оптическая система растрового электронного микроскопа.

Во время взаимодействия электронного зонда и образца, (рисунок 3.11) первым сигналом является рентгеновское излучение, делящееся на два вида: характеристическое и тормозное.

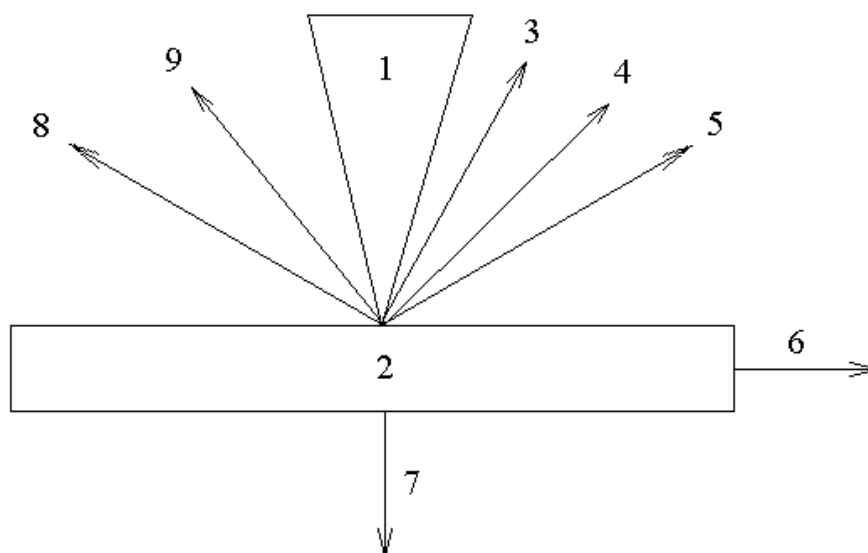


Рисунок 3.11 – Эффекты взаимодействия электронного луча с объектом:
 1 – электронный луч; 2 – объект; 3 – отраженные электроны; 4 – вторичные электроны; 5 – Оже-электроны; 6 – ток поглощенных электронов;
 7 – прошедшие электроны; 8 – катодно-люминесцентное излучение;
 9 – рентгеновское излучение

Тормозное рентгеновское радиоизлучение появляется из-за торможения первичных электронов в электрическом (кулоновском) поле атомов рассматриваемого вещества. Кинетическая энергия первичных электронов в данном случае отчасти либо целиком реорганизуется в энергию рентгеновского излучения. В соответствии с этим радиоизлучение имеет постоянный спектр с энергией от нулевой отметки вплоть до энергии падающего электрона, и по этой причине его ещё именуют непрерывным рентгеновским излучением. При рентгеноспектральном микроанализе тормозное радиоизлучение нежелательно, так как вносит главный вклад в повышение уровня фона и никак не может быть исключено.

При вторжении первичных электронов в образец они задерживаются никак не только лишь электрическим полем атомов, но и прямым столкновением с электронами атомов вещества. В следствии этого

первичные электроны имеют все шансы выбивать электроны с внутренних К-, L- либо М-оболочек, сохраняя атом образца в энергетически взволнованном пребывании. Возникающие вакансии наполняются переходами электронов с наиболее высоких энергетических уровней. Атом переходит в основное положение, излишняя энергия выделяется в виде кванта рентгеновского излучения. Так как энергия появляющегося кванта находится в зависимости только лишь от энергии участвующих в процессе электронных степеней, а они являются отличительными для любого компонента, появляется характеристическое рентгеновское радиоизлучение. Таким образом, любой атом имеет абсолютно конкретное окончательное число уровней, среди которых вероятны переходы только лишь определенного типа, характеристическое рентгеновское радиоизлучение дает дискретный линейчатый спектр.

Рентгеноспектральным микроанализом никак не получается установить в составе сплава легковесные компоненты с последовательным номером менее 4. Появляются подобные проблемы и с выявлением компонентов, когда на линии К-серии 1-го компонента накладываются направления L-либо М-серии иного компонента. Значимой чертой РСМА считается его ограниченность, т.е. количество материала, в котором поднимается характеристическое рентгеновское радиоизлучение. Он обуславливается в главную очередность диаметром электронного зонда на образце и находится в зависимости с ускоряющего напряжения и хим состава вещества.

Исследование распределения элементов может быть сделан в качественном, полуколичественном и количественном варианте. Качественный анализ устанавливает вид элементов, вступающих в состав исследуемого места образца. В случае если образец содержит некоторое количество фаз (участков), химический состав которых незнаком, то

производится качественный анализ каждой фазы. Качественный анализ как правило применяется для установления характера распределения элементов по площади шлифа. Уже после качественного анализа зачастую выполняют количественный анализ в в отдельности выбранных точках, согласно приобретенным сведениям программное обеспечение дает возможность установить тип фазы отталкиваясь из её химического состава. Полуколичественный анализ реализуется, в случае если необходимо установить распределение элементов вдоль линий (линейный анализ). Линейный анализ производится способом шагового сканирования, т.е. посредством поочередного выполнения анализа в единичных точках. Таким образом, исполняется количественное определение сосредоточения элементов с установленной точностью.

3.6 Методика проведения рентгеноструктурного анализа порошков

Для исследования структуры частиц полученных порошковых материалов проводили их рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV

Дифрактометр высокого разрешения «Ultima IV» Rigaku с кобальтовым анодом для прецизионного определения качественного и количественного фазового состава поликристаллических и керамических, материалов, в том числе, с высоким содержанием железа.

Ultima IV является единственным дифрактометром с полностью автоматической юстировкой всей рентгенооптической системы. Благодаря возможности автоматически юстировать систему в сочетании с СВО-оптикой и in-plane геометрией, этот дифрактометр является наиболее гибкой системой, доступной для решения широкого круга прикладных задач. СВО-оптика позволяет существенно снизить временные затраты при переходе от одной геометрии измерений к другой, допускает ежедневное использование обеих геометрий без необходимости перенастройки системы, не подвержена износу и выходу из строя в результате многочисленных переключений. СВО-оптика и автоматическая юстировка, скомбинированные вместе, предоставляют максимальную функциональность для решения задач

порошковой дифрактометрии, дифрактометрии тонких пленок, малоуглового рассеяния, и in-plane рассеяния.

Особенности:

Основным достоинством дифрактометрического комплекса Ultima IV является большой набор использования комбинаций элементов рентгенооптической системы вследствие применения технологии СВО. В результате пользователь получает следующие режимы: фокусирующий (Focusing), режим параллельного пучка (Parallel), режим высокого разрешения (High resolution), малоугловое рассеяние (SAXS) и, наконец, режим исследования микрообластей (MicroArea).

По применимости данные режимы распределяются таким образом:

Режим Focusing – идентификация фазового состава, определение размеров кристаллитов, определение кристалличности материала в %;

Комбинация режимов Focusing/Parallel beam – определение рельефа поверхности, остаточные напряжения материала, распределения по размерам наночастиц/нанопор, обычная дифракция;

Режим Parallel beam – определение толщины и плотности пленок, аттестация эпитаксиальных пленок, аттестация сверхтонких пленок;

Второй уникальной технологией, примененной в Ultima IV является полностью автоматическая юстировка (Automatic alignment), которая регулирует положение по высоте источника рентгеновского излучения, направление падающего пучка, угол наклона фокусирующего зеркала, размер щелей, точку нулевого отсчета для 2θ , установку режимов детектора. После такой автоматической настройки пользователь получает то, что принято называть идеальным сигналом (см. рисунок):

Следующей перспективной технологией, использованной в Ultima IV является автоматическое конфигурирование дифрактометра, при котором

прибор сам распознает присоединяемые устройства и опциональные дополнения (рисунок показывает типичное окно автоматического распознавания и конфигурирования системы):

Таким образом, существенно экономится время, затрачиваемое пользователем на подготовку системы к измерениям.

Порошковый материал исследуемого образца засыпают в кювету, которая имеет следующие габаритные размеры: диаметр 20 мм, глубина 0,5 мм. Затем их спрессовывают. При этом необходимо параллельность краёв кюветы с поверхностью образца. Затем, в держатель устанавливают кювету. Это делается для того, чтобы совместить плоскость фокусировки с поверхностью образца.

3.7 Методика получения спеченных образцов

Для получения спеченных материалов был использован изостатический пресс EPSI CIP 400-200*1000Y (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Изостатический пресс EPSI CIP 400-200*1000Y

Процесс изостатического прессования схематически приведен на рисунке 3.14.

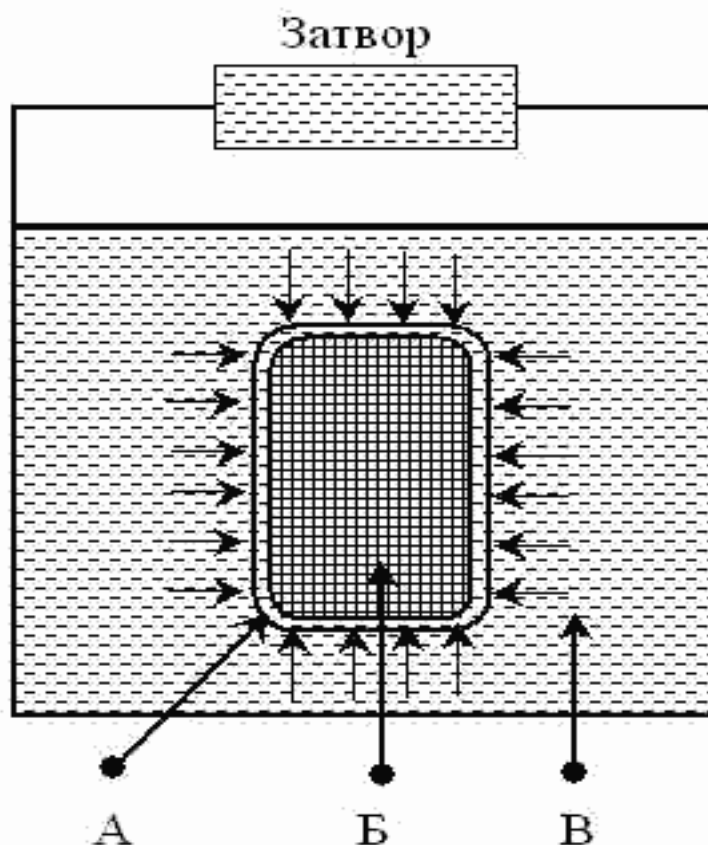


Рисунок 3.14 – Схема изостатического прессования: А – резиновая форма; Б – компактируемая заготовка; В – рабочая жидкость (вода)

В начале прессования порошковые материалы вкладывали в эластичную резиновую форму и заранее вручную уплотняли вплоть до плотности $3,1847 \text{ г/см}^3$. Затем образцы вкладывали в рабочую камеру пресса при температуре 18°C , давление усиливали вплоть до нужной величины, при этом давлении образец выдерживался на протяжении 2 мин., уже, после чего давление скидывали вплоть до атмосферного, и скомпактированные образцы извлекали из резиновой формы. Применялось следующее давление изостатического прессования равное 250 МПа. После компактирования полученные образцы спекали на протяжении 2 часов при температуре 1250 Nabertherm VHT 8/22 (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Печь Nabertherm VHT 8/22

Поверхность образца шлифовали и полировали. Шлифование производили металлографической бумагой с крупным (№ 60-70) и мелким зерном (№ 220-240). Во время шлифования образец время от времени поворачивали на 90° . В процессе шлифования зафиксирована рыхлость краёв спеченного образца, которая привела к откалыванию частиц и частичному разрушению поверхности шлифа. Частицы абразива смывали водой и подвергали полированию на круге суспензиями из оксидов металлов (Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , Al_2O_3). После достижения зеркального блеска, поверхность шлифа промывали водой, спиртом и просушивали фильтровальной бумагой. Травление шлифов, изготовленных из образцов, проводили погружением на несколько секунд в раствор. По завершению травления поверхность

промывали водой, спиртом и сушили с помощью фильтровальной бумаги. Реактив для травления стали имеет следующий состав: 5 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте (реактив Ржешотарского).

3.8 Методика исследования твердости образца

Микротвердость по методу Виккерса формируется согласно итогам замера диагоналей оттиска, образующегося на поверхности, подготовленной для испытания, во время нажатия алмазной четырехгранной пирамидки с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$ (рисунок 3.16).

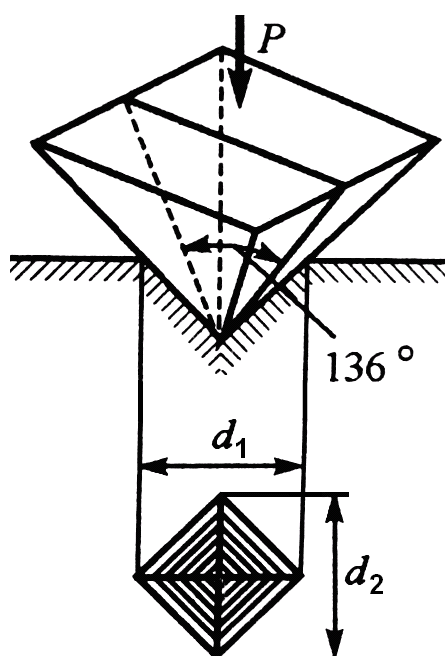


Рисунок 3.16 – Схема определения твердости металла по методу Виккерса:

P – нагрузка, кгс; d_1 и d_2 – диагонали отпечатка, мм

По окончании нажатия измеряют диагонали оттиска d_1 и d_2 . Значение микротвердости по методу Виккерса является собой нагрузкой, приходящейся на единицу поверхности отпечатка в виде пирамиды.

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad 3.1$$

где, HV - твёрдость по Виккерсу,

$$P - \text{нагрузка}; \quad d = \frac{(d_1 + d_2)}{2},$$

d_1 и d_2 - диагонали отпечатка, мм. Обычно значение P принимают в пределах 50...1000 Н.

На микроскопе измеряют величину диагоналей. Главными параметрами с целью установления микротвёрдости по Виккерсу являются: нагрузка – 30 кгс, время выдержки для сталей – 10...15 с, размерность числа твердости (кгс/мм²) не ставится. Например, 420 HV означает твёрдость, полученную при этих параметрах. В случае, когда параметры измерения имеют отличие от основных (для цветных металлов продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают 30 с) то записывают таким образом, к примеру, 450 HV10/15 – означает, что число твердости по Виккерсу 450 получено при нагрузке 10 кгс(98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15 с.

Испытания микротвёрдости спеченного образца по поверхности и поперечному шлифу осуществляли при помощи автоматической системы анализа микротвёрдости DM-8 по методу микро-Виккерса. Нагрузка на индентор была равно 50 г. Замеры проводили по десяти отпечаткам со произвольным выбором места укола согласно ГОСТу 9450-76 (Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников). Время нагружения индентора составило 15 с (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17 – Анализатор микротвердости DM-8

3.9 Методика исследования предела прочности при изгибе спеченного образца

Предел прочности при изгибе спеченного образца определяли на универсальной напольной электромеханической испытательной машине «Instron 300LX-B1-C3-J1C» (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Напольная электромеханической испытательной машине «Instron 300LX-B1-C3-J1C»

Instron 300LX-B1-C3-J1C разработана для проведения испытаний на растяжение с высокой нагрузочной способностью, а также для испытаний на сжатие, изгиб и сдвиг. Модель Instron 300LX-B1-C3-J1C работает от гидравлической насосной системы, которая приводит в движение привод с длинным рабочим ходом, создающий необходимое усилие для испытания. Идеально подходит для испытаний на предельную прочность и напряжение при растяжении крепежных деталей, цепей, образцов с резьбовыми концами и заплечиками по концам, катанки и листовых материалов. В наличии имеются ручные зажимы траверсы и колонны с насечками или автоматические подъемники и зажимы для начала испытания.

Техническое описание:

- нагрузка 300 кН;
- максимальная скорость нагружения 76 мм/мин;
- ход привода 152 мм.

3.10 Выводы к главе 3

1. Для получения порошковых материалов, в качестве исходного (диспергируемого) материала использовали отходы шарикоподшипниковой стали марки ШХ15.

2. Для достижения поставленных целей и задач использовались современное оборудование, методики исследований и материалы:

– гранулометрический состав порошковых материалов, проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analysette 22 NanoTec;

– определение формы и морфологии поверхности частиц, исследование элементного состава образцов порошковых материалов проводили на растровом (сканирующем) электронном микроскопе Nova NanoSEM 450;

– рентгеноспектральный микроанализ выполнен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп Nova NanoSEM 450;

– рентгеноструктурный (фазовый) анализ порошковых материалов проводили на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV;

– для получения спеченных материалов был использован изостатический пресс EPSI CIP 400-200*1000Y;

– испытания твердости образца по поверхности и поперечному шлиффу проводили с помощью автоматической системы анализа микротвердости DM-8 по методу микро-Виккерса;

– предел прочности при изгибе спеченного образца определяли на универсальной напольной электромеханической испытательной машине «Instron 300LX-B1-C3-J1C» и др.

ГЛАВА 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Исследование влияния электрических параметров установки ЭЭД на гранулометрический состав порошковых материалов

Для исследования влияния параметров диспергирования гранулометрический состав порошковых материалов был проведён ряд экспериментов. На рисунках 4.1 – 4.3 представлены графики зависимости среднего размера частиц порошкового материала от электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов [101, 102, 106–108].

На рисунке 4.1 представлен график зависимости среднего размера частиц порошкового материала стали ШХ15 от ёмкости разрядных конденсаторов при постоянном напряжении на электродах $U=100$ и постоянной частоте следования импульсов $\nu=100$ Гц.

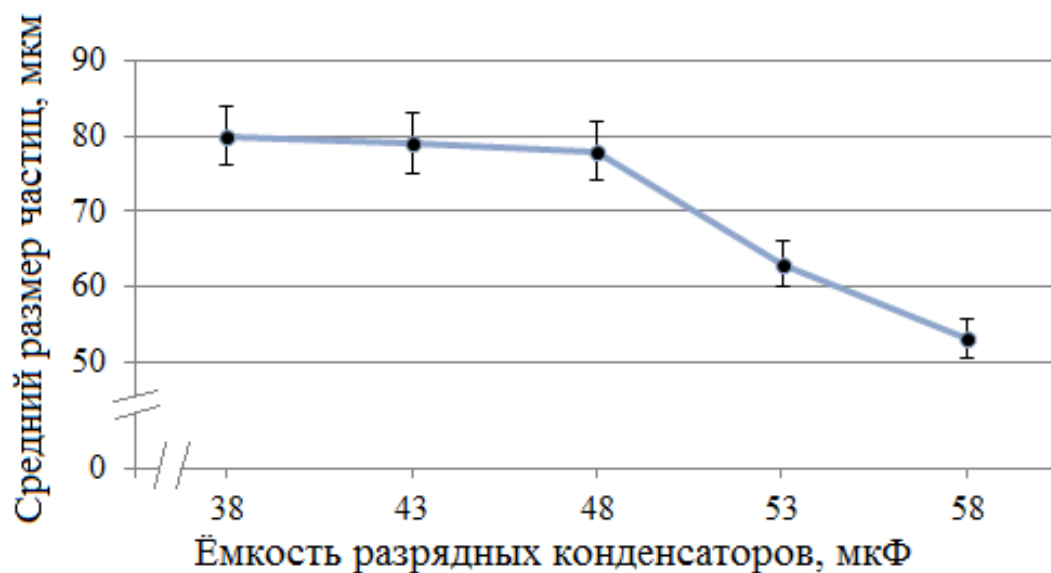


Рисунок 4.1 – Зависимость среднего размера частиц порошкового материала от ёмкости разрядных конденсаторов

На рисунке 4.2 представлен график зависимости среднего размера частиц порошкового материала ШХ15 от напряжения на электродах реактора установки ЭЭД, при постоянной частоте следования импульсов $\nu=100$ Гц и постоянной ёмкости разрядных конденсаторов $C=58$ мкФ.

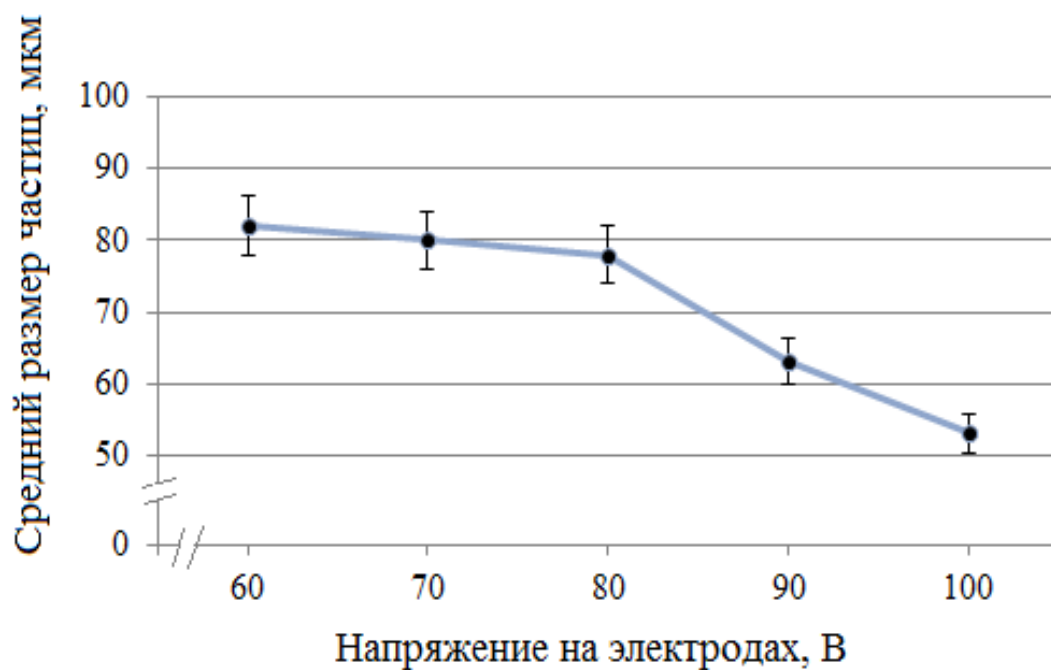


Рисунок 4.2 – Зависимость среднего размера частиц порошкового материала от напряжения на электродах ректора

На рисунке 4.3 представлен график зависимости среднего размера частиц порошкового материала ШХ15 от рабочей частоты генератора импульсов при постоянном напряжении на электродах $U=100$ В и постоянной ёмкости разрядных конденсаторов $C=58$ мкФ.

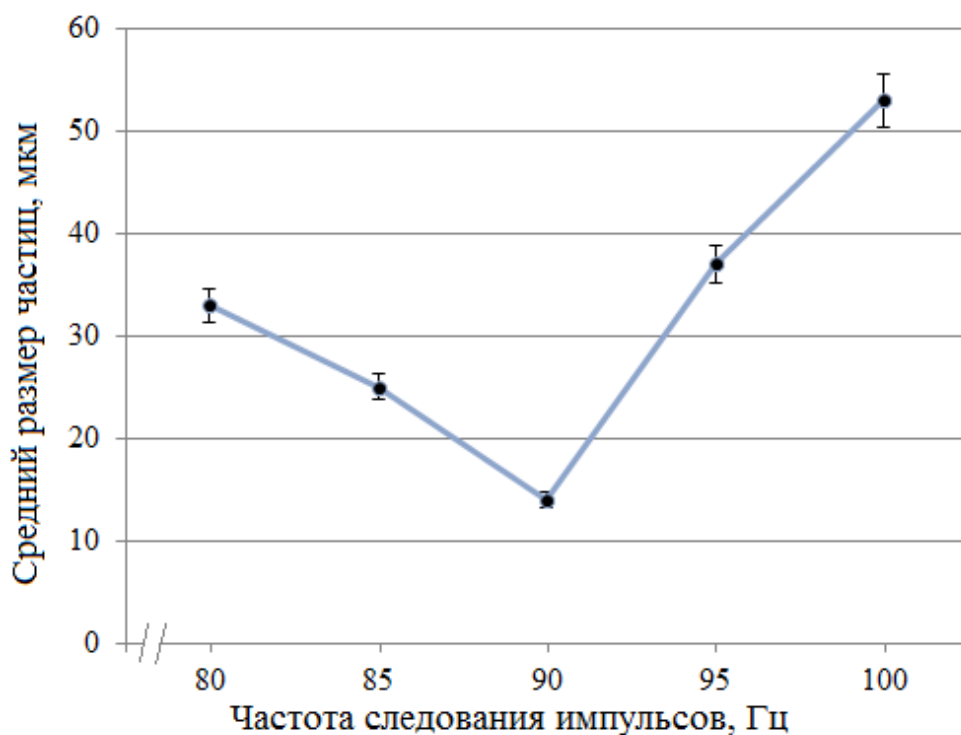


Рисунок 4.3 – Зависимость среднего размера частиц порошкового материала от рабочей частоты установки ЭЭД

В ходе проведенных исследований были установлены обратно пропорциональные зависимости среднего размера частиц порошкового материала от ёмкости разрядных конденсаторов и от величины напряжения на электродах в реакторе. Также установлена обратно пропорциональная зависимость среднего размера частиц порошкового материала от частоты следования импульсов установки ЭЭД в интервале до 90 Гц. Дальнейшее увеличение ёмкости разрядных конденсаторов приводит к увеличению среднего размера частиц порошкового материала.

4.2 Постановка факторного эксперимента

Постановка факторного эксперимента проводилась с целью определения оптимальных электрических параметров установки электроэрозионного диспергирования для диспергирования отходов шарикоподшипниковой стали.

Оптимальные режимы работы установки ЭЭД определяли постановкой полного факторного эксперимента, который в результате проводили по среднему размеру частиц порошкового материала.

Для проведения факторного эксперимента выбрали уровни и интервалы изменения всех возможных факторов (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Уровни и интервалы варьирования

Наименование	Факторы		
	X ₁ (C, мкФ)	X ₂ (f, Гц)	X ₃ (U, В)
Основной уровень	38	80	120
Интервал варьирования	10	20	20
Верхний уровень (+)	68	160	180
Нижний уровень (-)	28	40	60

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица планирования эксперимента

Но мер опы та	Порядок реализа ции опыта	X ₀ (Ср еда)	X ₁ (С, мкФ)	X ₂ (f, Гц)	X ₃ (U, B)	X ₁ X ₂	X ₂ X ₃	X ₁ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y (D, мкм)
1	7	+	+	+	+	+	-	-	+	78,89
2	2	+	-	+	+	+	+	-	-	33,87
3	8	+	+	-	+	-	-	+	-	5,88
4	3	+	-	-	+	+	+	+	+	53,44
5	1	+	+	+	-	+	+	+	-	14,76
6	4	+	-	+	-	-	-	+	+	79,97
7	5	+	+	-	-	-	+	-	+	80,84
8	6	+	-	-	-	+	-	-	-	79,92

С целью установления дисперсии параметра оптимизации было проведено 3 эксперимента с целью определения факторов на главных уровнях. Определенные значимости параметра оптимизации y_u , его среднее значение \bar{y} , отклонения значений параметра оптимизации от его среднего значения ($y_u - \bar{y}$) и квадраты их отклонений приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Вспомогательная таблица для расчета S_{y^2}

№ опыта	y_u	\bar{y}	$(y_u - \bar{y})$	$(y_u - \bar{y})^2$
1	53,64	$\sum_{n=1}^3 y_u / 3 = 53,44$	0	0
2	53,44		+0,2	0,04
3	53,24		-0,2	0,04
$\Sigma(y_u - \bar{y})^2$				0,08

Дисперсия параметра оптимизации:

$$S_y^2 = \frac{1}{3-1} \sum_{n=1}^3 (y_U - y^A)^2 \quad (4.1)$$

$$S_{y^2} = 0,04.$$

Далее получаем коэффициенты модели:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad (4.2)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_i \quad (4.3)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{ij} y_i \quad (4.4)$$

$$b_0=6,68; b_1=20,04; b_2=40,08; b_3=80,16.$$

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии:

$$S\{b_i\} = (S_y / N)^{1/2}. \quad (4.5)$$

$$S\{b_i\} = (S^2_y / 8)^{1/2} = 0,07.$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии при числе степеней свободы $f=2$:

$$\Delta b = \pm t \cdot S\{b_i\}. \quad (4.6)$$

$$\Delta b = \pm 4,3 \cdot 0,07 = \pm 0,3.$$

Все без исключения коэффициенты регрессии согласно абсолютной величине более доверительного промежутка, по этой причине их возможно принять статично важными. Таким образом, получили модель в виде полинома первой степени:

$$Y = 6,68 + 20,04 \cdot X_1 + 40,08 \cdot X_2 + 80,16 \cdot X_3 + 133,86 \cdot X_1 X_2 + 803,20 \cdot X_2 X_3 + 1606,40 \cdot X_1 X_3.$$

Согласно полученной модели, параметр оптимизации возрастает с увеличением значений факторов X_1 , X_2 и X_3 . Причем, наибольшее влияние оказывает параметр X_3 , т.е. напряжение на электродах.

Проверку адекватности модели производили по F-критерию Фишера. С целью подсчета дисперсии адекватности собрали дополнительную табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Вспомогательная таблица для расчета $S_{ад}^2$

Номер опыта	y_j	\hat{y}_j	$y_j - \hat{y}_j$	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
1	78,89	78,41	0,48	0,2304
2	33,87	34,16	-0,29	0,0841
3	5,88	6,17	-0,19	0,0361
4	53,44	53,29	0,13	0,0169
5	14,76	14,92	-0,16	0,0256
6	79,97	79,25	0,72	0,5184
7	80,84	80,15	0,69	0,4761
8	79,92	79,59	0,33	0,1089
$\sum (y_j - \hat{y}_j)^2$				1,49

$$S_{ад}^2 = (y_j - \hat{y}_j)^2 / (N - (k + 1)). \quad (4.7)$$

$$S_{ад}^2 = 1,49 / (8 - (3 + 1)) = 0,37.$$

$$F_p = S_{ад}^2 / S_y^2 = 0,38 / 0,04 = 9,3.$$

Табличное значение F_T -критерия при 5 % уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 4 и для знаменателя 2 равно 19,3. $F_p < F_T$. Следовательно, модель адекватна.

Полученное уравнение было использовано для крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни): $X_1=48$ мкФ, $X_2=100$ Гц, $X_3=80$ В (таблица 4.5). Шаг движения для фактора X_1 приняли равным 5 мкФ. Вычислили шаг движения для $X_2 = 10,3$, $X_3 = 9,8$.

Таблица 4.5 – Расчет крутого восхождения

Наименование	X_1 (С, мкФ)	X_2 (f, Гц)	X_3 (U, В)	Y
Основной уровень	48	100	80	–
Коэффициент b_i	13,4	13,8	73,3	–
Интервал варьирования ξ_i	10	20	20	–
$b_i \cdot \xi_i$	134	276	1466	–
Шаг Δ_i	5	10,3	9,8	–
Округленный шаг	5	10	10	–
Мысленный опыт	38	60	60	–
Мысленный опыт	43	80	80	–
Реализованный опыт 9	48	100	100	53,44
Мысленный опыт	53	120	120	–
Реализованный опыт 10	58	140	140	5,33
Реализованный опыт 11	63	160	160	14,76

Согласно завершению опыта в последних уровнях существовало принято предельное значение параметра оптимизации Y, которое составило 5,33 мкм. Таким образом, оптимальными параметрами для процесса получения порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования в воде дистиллированной являются: ёмкость разрядных

конденсаторов 58 мФ, напряжение на электродах 140 В, частота следования импульсов 140 Гц.

4.3 Гранулометрический состав порошковых материалов

В зависимости от способа получения порошковых материалов, их габариты могут меняться в больших пределах, начиная с долей микрон вплоть до сотен и даже тыс. микрон.

Приводятся противоречивые данные сравнительно связи среднего размера элементов порошкового материала, гранулометрического состава и режимов получения порошкового материала, которые, видимо, обусловлены значимыми отличиями в конструкциях установок ЭЭД, реакторов и разными режимами диспергирования. Однако в общем случае, возможно, отметить следующее.

Порошковые материалы, которые получены методом ЭЭД из отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15, в зависимости от режимов их извлечения (в основном от энергии импульса), располагают достаточно обширным интервалом распределения элементов согласно величинам – от нескольких нанометров вплоть до сотен микрон [90-100, 115]. Можно получать порошковые материалы с нужным средним размером частиц варьируя энергию импульса. Но даже порошковый материал, полученный на одном режиме, также имеет весьма широкий диапазон расхождения частиц по своим размерам. Причина этому – реализация таких механизмов образования частиц как хрупкое разрушение, кристаллизация паровой и жидкой фазы.

После кристаллизации расплавленного материала образуются сферические и эллиптические частицы размером от десятков нанометров до сотен микрон. На их размер влияет режим получения.

В результате хрупкого разрушения материала под термическим и механическим воздействием при процессе ЭЭД образуются осколочные частицы средним размером от единиц до сотен микрон.

Частицы в виде хлопьев образуются при кристаллизации паров используемого материала. Их размер обычно меняется от нескольких нанометров до 1 микрона. Обычно они образуют агломераты или облепляют более крупные частицы.

Энергия импульса влияет на средний размер частиц порошкового материала получаемого электроэрозионным диспергированием. В свою очередь, напряжение на электродах, ёмкость разрядных конденсаторов, напряжение пробоя РЖ и другие факторы, оказывают влияние на энергию импульса (разряда).

На рисунках 4.4, 4.5 показано распределение по размерам частиц порошковых материалов, полученных из отходов шарикоподшипниковой стали в воде дистиллированной и керосине осветительном.

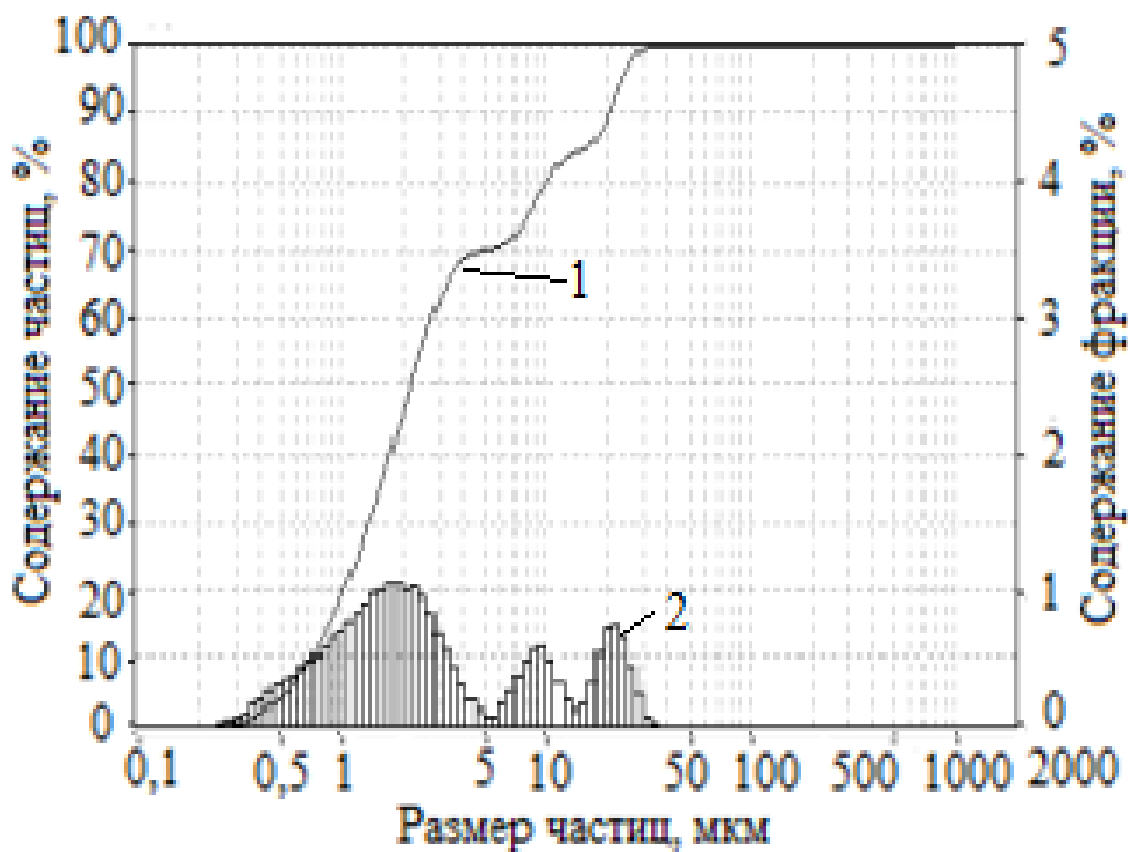


Рисунок 4.4 – Распределение по размерам частиц порошка ШХ15 в воде дистиллированной: 1 – интегральная кривая, 2 – гистограмма

Экспериментально установлено, что удельная площадь поверхности частиц порошкового материала составляет $36844,32 \text{ см}^2/\text{см}^3$, средний размер частиц – 5,88 мкм, коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 2,16 мкм – 2,49.

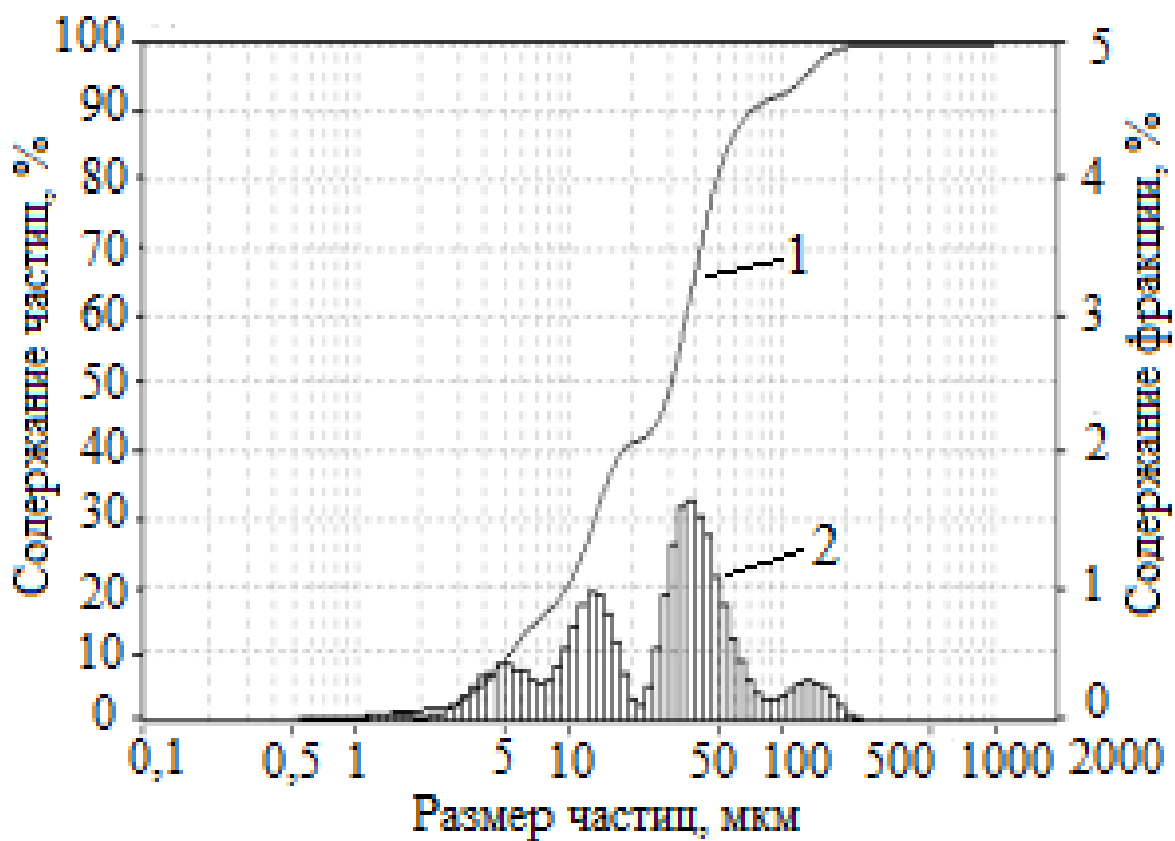


Рисунок 4.5 – Распределение по размерам частиц порошка ШХ15 в керосине осветительном: 1 – интегральная кривая, 2 – гистограмма

Экспериментально установлено, что удельная площадь поверхности частиц порошкового материала составляет $5012,6 \text{ см}^2/\text{см}^3$, средний размер частиц – $36,53 \text{ мкм}$, коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером $27,49 \text{ мкм}$ составляет $2,32$.

Таблица 4.6 – Распределение по размерам частиц порошкового материала полученного в различных средах

Размерность частиц порошкового материала	ШХ15 в керосине осветительном	ШХ15 в воде дистиллированной
D10 (10% частиц), мкм	5,23	0,87
D20 (20% частиц), мкм	9,68	1,60
D30 (30% частиц), мкм	13,12	2,53
D40 (40% частиц), мкм	17,97	4,57
D50 (50% частиц), мкм	30,65	7,43
D60 (60% частиц), мкм	35,86	11,48
D70 (70% частиц), мкм	41,54	22,93
D80 (80% частиц), мкм	49,54	42,90
D90 (90% частиц), мкм	71,28	55,39
d[4,3] Объемный средний диаметр, мкм	36,53	26,25
d[3,2] Средний диаметр по площади поверхности, мкм	11,97	2,55
d[3,0] Средний диаметр по отношению к объему, мкм	2,39	1,01
d[2,0] Средний диаметр по отношению к площади, мкм	1,07	0,63
d[1,0] средний диаметр по отношению к длине, мкм	0,54	0,51

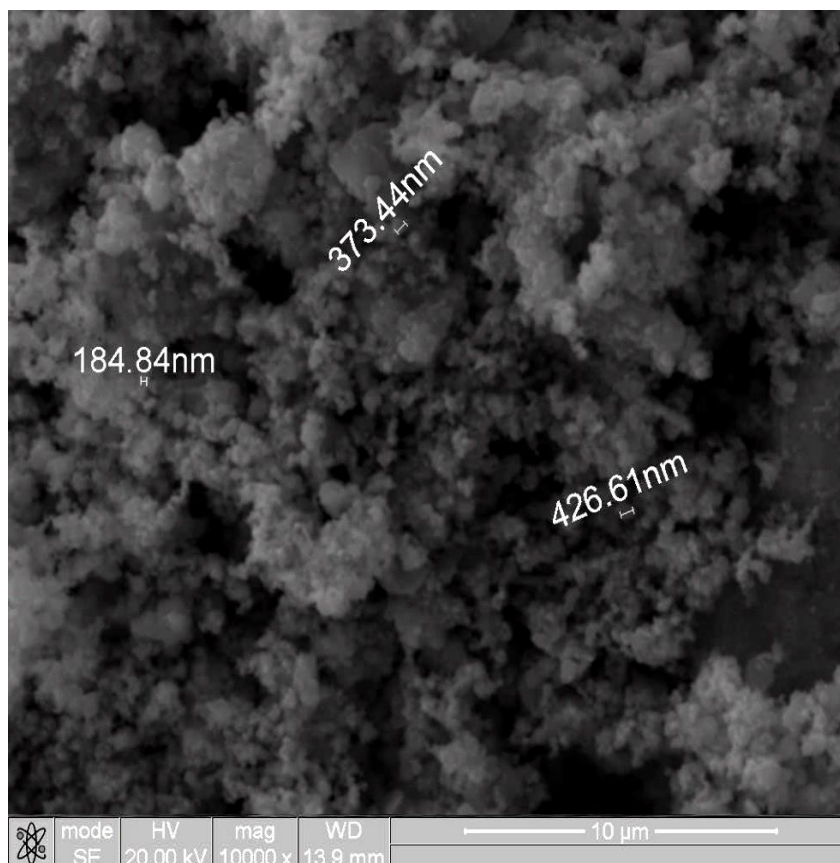
В таблице 4.6 приведены данные, которые следует читать как: D50 (50% частиц) – 30,653 мкм, то есть частиц, размером меньше или равно 30,653 мкм в порошке содержится 50,0% от общего объема.

4.4 Форма и морфология частиц порошковых материалов

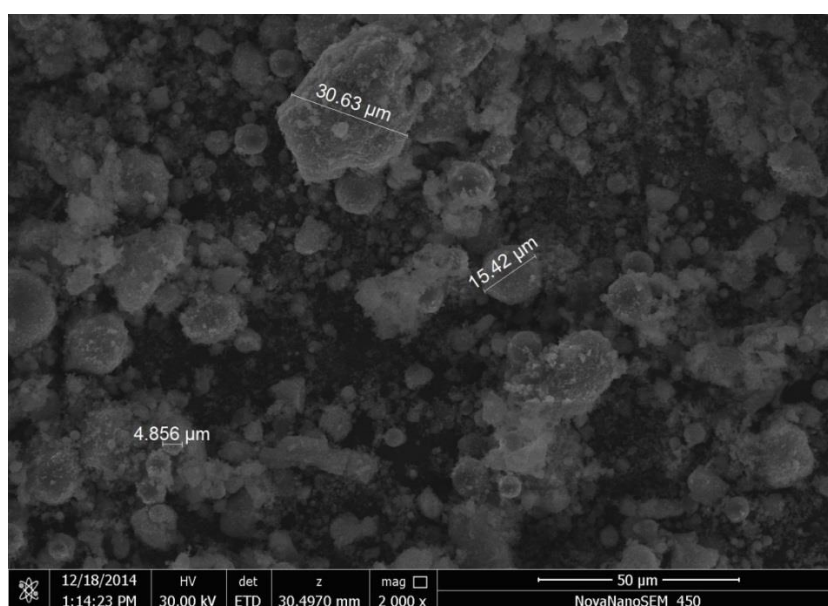
Форма частиц порошковых материалов различная по виду. Частицы могут быть в виде сфер или капель, иметь губчатую тарельчатую, дендритную, осколочную, волокнистую и лепестковидную форму [98–100, 112–114]. Это зависит от химической природы металла и способа получения порошкового материала.

Форма частиц порошковых материалов и состояние их плоскости выражает огромное воздействие на насыпную плотность и сжимаемость, а кроме того на плотность, надежность и однотипность прессовок. Минимальную насыпную плотность и максимальную прочность имеют прессовки с порошков с дендритической формой крупы. Напротив, порошковые материалы с частичками круглой формы обладают наибольшей насыпную плотность, однако слабо прессуются. С целью получения из них прессовок с необходимой прочностью необходимы громадные давления. Очень плохо прессуются порошковые материалы с чешуйчатой формой, а прессовки, полученные из них, склонны к расслоению и растрескиванию.

Для того, чтобы изучить форму и морфологию частиц порошковых материалов, сделали снимки при помощи РЭМ Nova NanoSEM 450, которые представлены ниже (рисунок 4.6, 4.7).

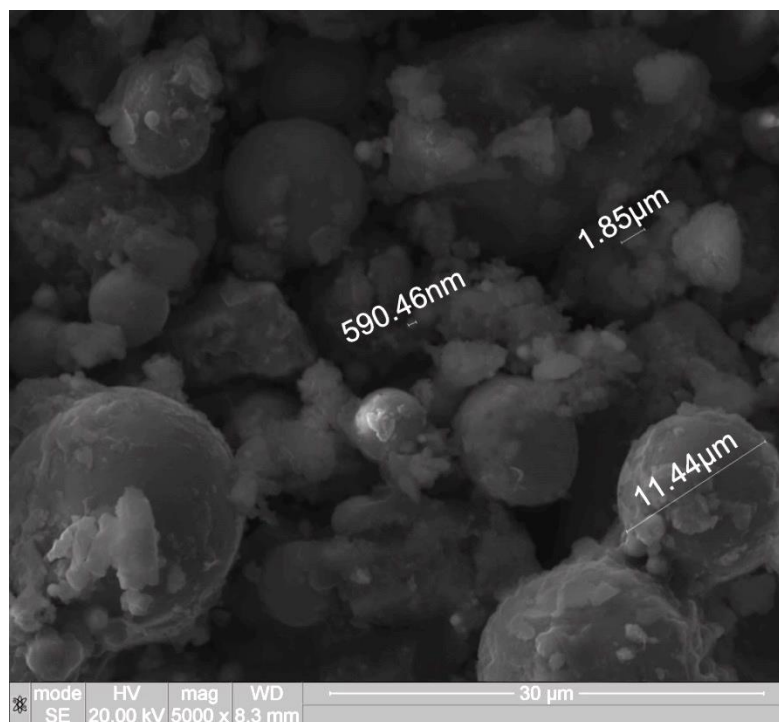


x10000

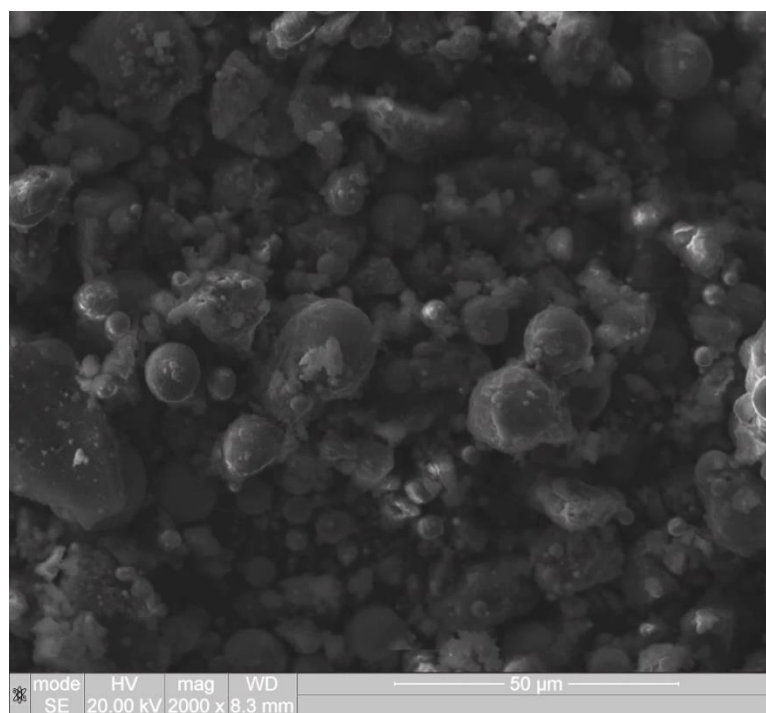


x2000

Рисунок 4.6 – Электронно-микроскопическое изображение порошкового материала ШХ15, полученного в воде дистиллированной



x5000



x2000

Рисунок 4.7 – Электронно-микроскопическое изображение порошкового материала ШХ15, полученного в керосине осветительном

Форма частиц порошкового материала определяется агрегатным состоянием вещества, выбрасываемого в процессе диспергирования из лунки. В основном в порошковом материале преобладают частицы, полученные затвердеванием жидкого материала (жидкая фаза). Эти частицы всегда эллиптической или сферической формы.

Возникающие при кристаллизации частички кипящего вещества, обычно, обладают некорректной формой, величина этих частиц поменьше частичек, возникающих из жидкой фазы, и часто они соединяются друг с другом, а так же они оседают на поверхности частичек большего размера. В процессе течения ЭЭД подобные частички максимально подвергаются хим и фазовым переменам. При большой мощности термического влияния образовывается паровая стадия и её эрозия происходит подобно взрыву. Применяя уравнение температурного поля, обрисовывающее термические движения на плоскости анода при влиянии на него канала искрового разряда [39], авторы [58] сумели определить, что повышение продолжительности импульса приводит к возрастанию поперечника канала разряда, что, в свой черед, приводит к сокращению плотности мощности термического влияния. Из этого делаем вывод о том, что размер диаметра канала обратно пропорционален количеству паровой фазы в реакторе.

Под воздействием ударных волн канала разряда, а так же под воздействием термических напряжений образуются частицы, которые выбрасываются из лунки в твердой фазе. Также частицы твердой фазы образуются во время перемешивания диспергируемого материала возможно образование частиц в твердом состоянии. Обычно, такие частицы неправильной осколочной формы, часто их грани и края оплавлены. Как считают авторы [72], хрупкое разрушение отходов шарикоподшипниковой стали при электроэрозионном диспергировании происходит тогда, когда

величина энергии импульса поднимается выше 0,15–0,25 Дж. Однако часть крупниц в порошковом материале, возникшая вследствие хрупкого разлома при размешивании, практически постоянна.

В процессе электроэрозионного диспергирования частички порошкового материала, которые выбрасываются из канала разряда в расплавленном виде в реактор, заполненный РЖ, мгновенно затвердевают и закаляются. Этот процесс способствует приданию частицам формы сферы или эллипса. Уже по завершению из области разряда частички порошкового материала крайне часто встречаются между собой. В случае если в время столкновения кристаллизация была в полном объеме закончена, в таком случае на частичках остаются отличительные отпечатки от ударов сетки на поверхности.

В случае если присутствует существенная разность температур столкнувшихся крупниц, в таком случае происходит их склеивание с образованием хрупких граней. Как правило, такое совершается при столкновении больших крупниц, возникших из жидкой фазы, с небольшими частичками, возникшими из паровой фазы. В случае если не имеется значительной разницы температур крупниц при столкновении, то имеют все шансы формироваться конгломераты неправильных форм.

4.5 Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошковых материалов

С целью исследования распределения элементов по поверхности частиц порошковых материалов, проводили рентгеноспектральный микроанализ. РСМА проводили при помощи современного энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, который встроен в РЭМ Nova NanoSEM 450. Результаты РСМА представлены ниже (рисунок 4.8, 4.9) [103, 104].

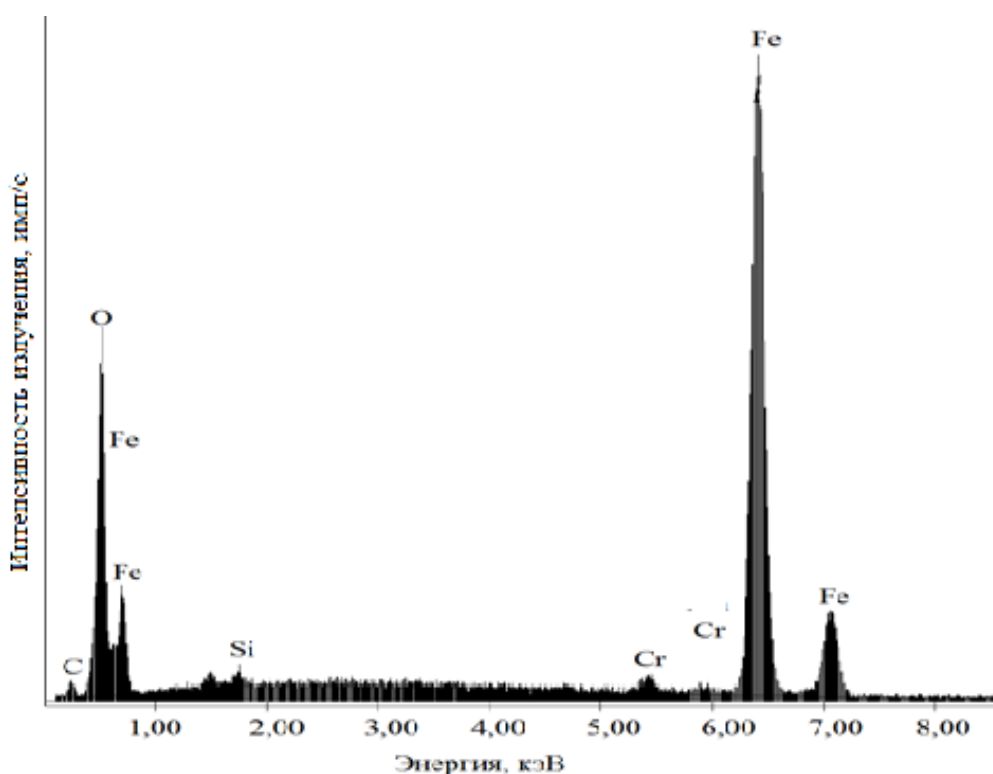


Рисунок 4.8 – Элементный состав поверхности частиц порошкового материала ШХ15, полученного в воде дистиллированной

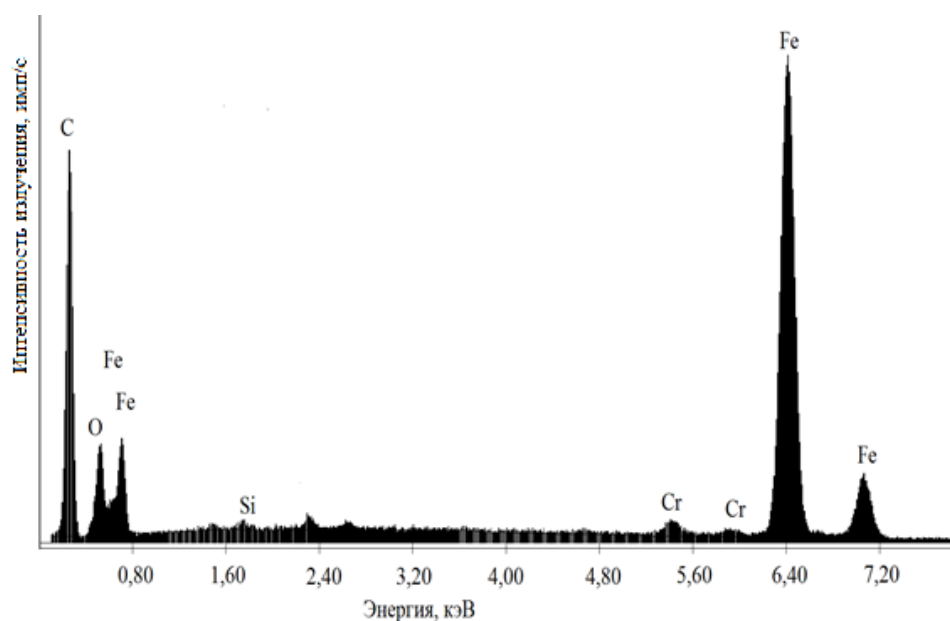


Рисунок 4.9 – Элементный состав поверхности частиц порошкового материала ШХ15, полученного в керосине осветительном

В таблицах 4.7 – 4.8 приведены результаты исследования рентгеноспектрального микроанализа порошковых материалов.

Таблица 4.7 – Рентгеноспектральный микроанализ порошкового материала, полученного из ШХ15 в воде дистиллированной

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
C	2,43	7,73
O	14,66	35,05
Si	0,51	0,69
Cr	1,16	0,86
Fe	81,24	55,77
Итого	100,00	100,00

Таблица 4.8 – Рентгеноспектральный микроанализ порошкового материала, полученного из ШХ15 в керосине осветительном

Элемент	Массовая доля, %	Атомарная доля, %
C	43,17	73,96
O	5,59	7,18
Si	0,22	0,16
Cr	0,96	0,38
Fe	50,06	18,31
Итого	100,00	100,00

Таким образом, порошковые материалы, полученные из отходов шарикоподшипниковой стали электроэрозионным диспергированием, на поверхности содержат большую часть железа, хрома, кислорода и углерода. Видно, что диспергирование в разных рабочих жидкостях влияет на элементный состав порошка.

4.6 Рентгеноструктурный (фазовый) состав порошковых материалов

Свойства частиц порошковых материалов во многом формируются их структурой, а от этого находится в зависимости сфера их использования. С целью изучения структур частиц порошковых материалов, полученных из отходов ШХ15, был проведен их рентгеноструктурный анализ (РСА) на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV [105].

Результаты исследования РСА порошковых материалов, полученных методом ЭЭД из отходов шарикоподшипниковой стали, представлены ниже (Рисунок 4.10, 4.11).

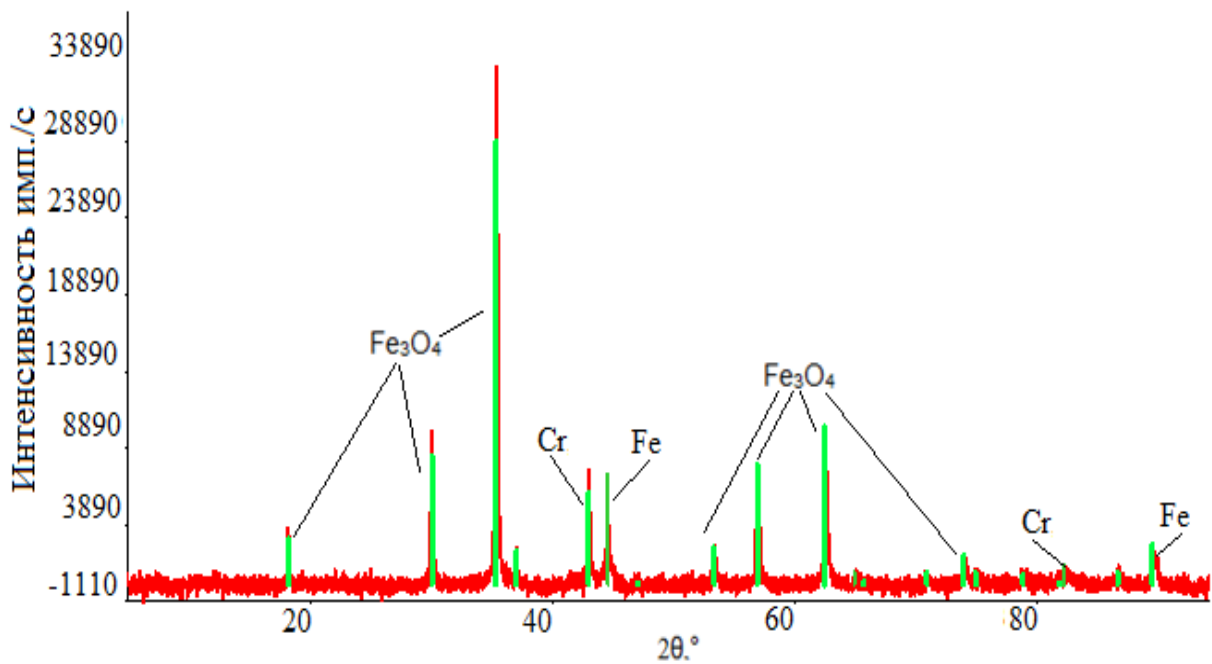


Рисунок 4.10 – Рентгенограмма порошка ШХ15 в воде дистиллированной

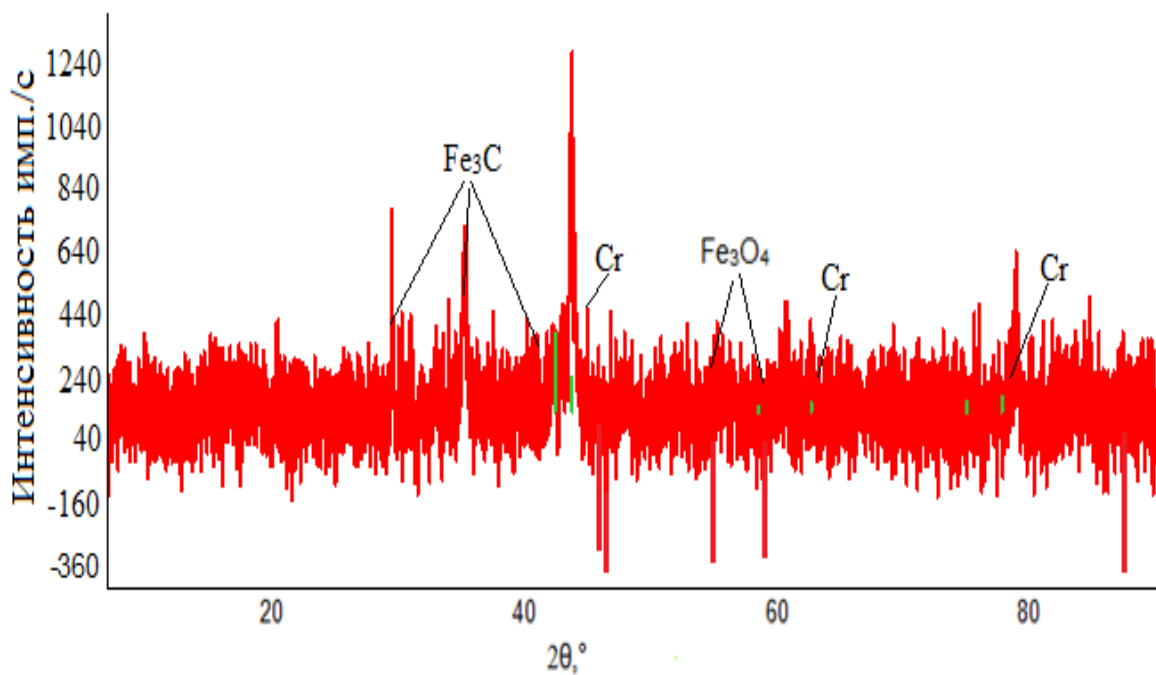


Рисунок 4.11 – Рентгенограмма порошкового материала ШХ15, в керосине осветительном

На экспериментальных рентгенограммах присутствуют сильные рефлексы соответствующие:

- фазе Fe_3O_4 (см. рисунок 4.10, 4.11);
- фазе Cr (см. рисунок 4.10, 4.11);
- фазе Fe (см. рисунок 4.10, 4.11);
- фазе Fe_3C (см. рисунок 4.11).

Высота, интенсивность и размер фаз представлены ниже (таблицы 4.9 – 4.10).

Таблица 4.9 – Максимумы рентгенограммы порошка ШХ15 в воде дистиллированной

2 θ , (градус)	Высота (Гц)	Интенсивность W (градус)	Размер (ангстрем)
1	2	3	4
18,228(18)	2637(105)	0,21(2)	656(116)
30,032(6)	7846(181)	0,215(9)	624(41)
35,3900(17)	28252(343)	0,216(4)	643(13)
37,030(17)	1705(84)	0,22(3)	581(89)
43,024(6)	5858(156)	0,245(13)	575(38)
44,609(11)	3026(112)	0,52(4)	360(42)
47(3)	4(4)	1(14)	115(308)
53,377(16)	2228(96)	0,23(3)	659(95)
56,906(5)	7136(172)	0,261(12)	584(25)

Окончание таблицы 4.9

1	2	3	4
62,482(5)	8998(194)	0,287(11)	556(20)
70,83(6)	752(56)	0,17(5)	701(172)
73,877(10)	1313(74)	0,57(7)	305(42)
78,70(6)	514(46)	0,61(18)	357(269)
82,36(17)	680(53)	1,2(3)	140(31)
86,74(5)	644(52)	0,48(12)	430(107)
89,56(2)	2013(92)	0,42(5)	443(53)

Таблица 4.10 – Максимумы рентгенограммы порошка ШХ15 в керосине осветительном

2 θ , (градус)	Высота (Гц)	Интенсивность W (градус)	Размер (ангстрем)
19,67(3)	113(31)	0,10(8)	4,509(8)
29,22(3)	188(40)	0,18(8)	3,054(3)
35,50(4)	343(54)	0,55(12)	2,527(3)
43,09(7)	146(35)	1,0(4)	2,098(3)
44,523(16)	773(81)	0,42(7)	2,0333(7)
57,387(16)	118(32)	0,36(17)	1,6044(4)
62,8(2)	73(25)	0,8(5)	1,479(5)
64,929(10)	181(39)	0,17(6)	1,4350(2)
82,37(13)	118(32)	0,7(4)	1,1698(15)

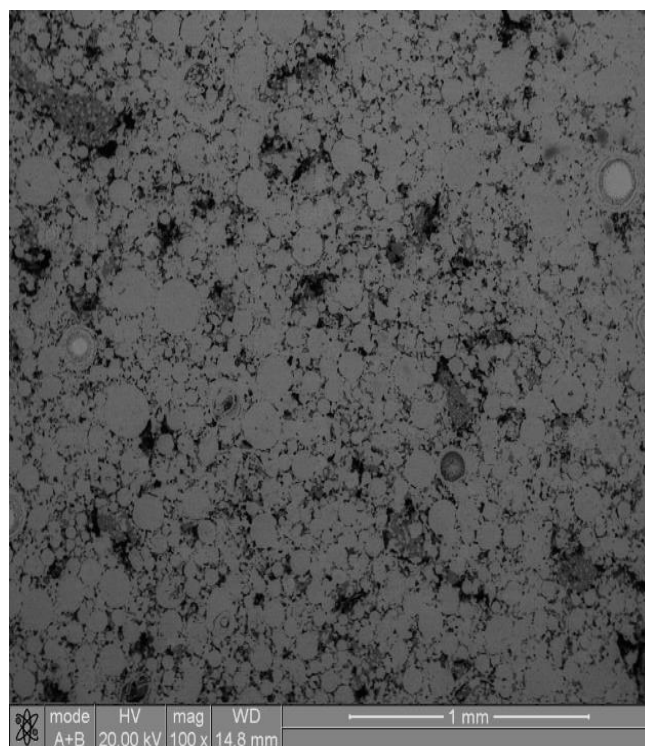
Фазовый состав порошкового материала, полученного способом ЭЭД, формируется природой рабочей жидкости, а именно: присутствием углерода, температурой кипения и диэлектрической проницаемостью.

Диспергирование отходов шарикоподшипниковой стали в кислородсодержащей жидкости (дистиллированной воде) способствует образованию оксидов: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 . Диспергирование сплавов отходов шарикоподшипниковой стали в керосине осветительном привело к обогащению углеродом и образованию фазы Fe_3C .

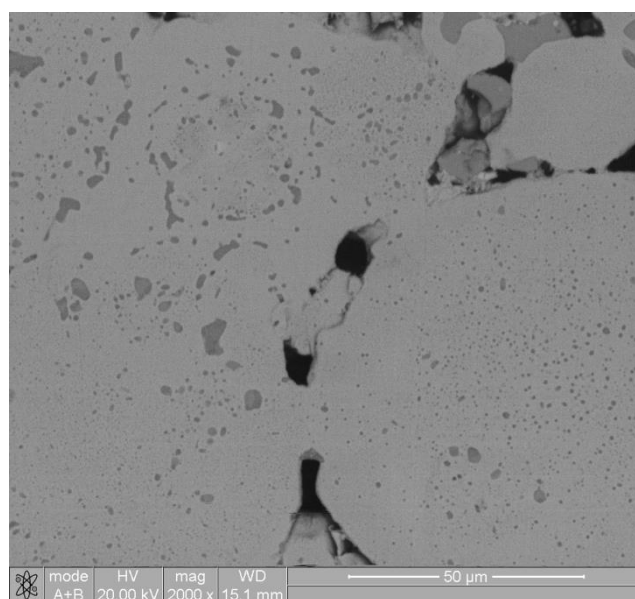
Таким образом, комплекс термохимических свойств рабочих жидкостей влияет на фазовый состав порошковых материалов, полученных методом ЭЭД. Это может определять выбор РЖ для получения заданного состава порошков.

4.7 Рентгеноспектральный микроанализ спеченных образцов

Результаты исследования элементного состава спеченного порошкового материала ШХ15, полученного в воде дистиллированной, представлены на рисунках 4.12, 4.13 и таблице 4.11 [109].



а) x100



б) x2000

Рисунок 4.12 – Микроструктура спеченного порошкового материала ШХ (снимок с РЭМ): а) участок 1; б) участок 2

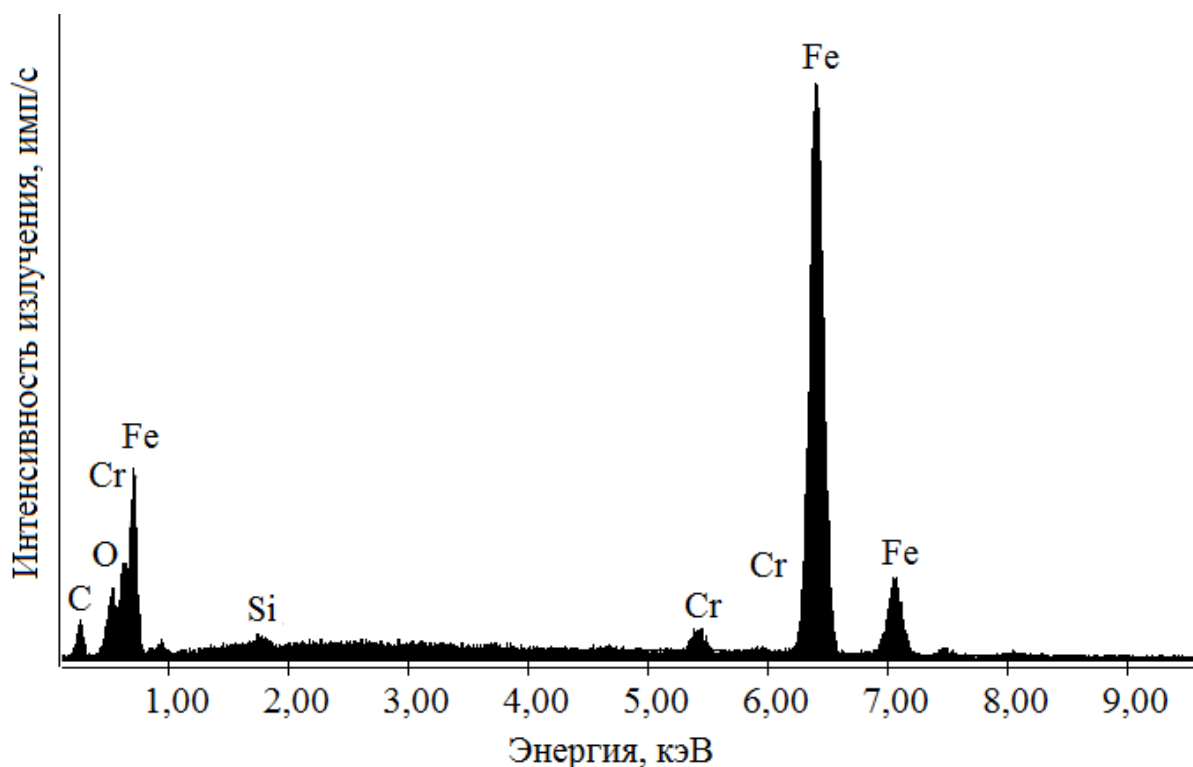


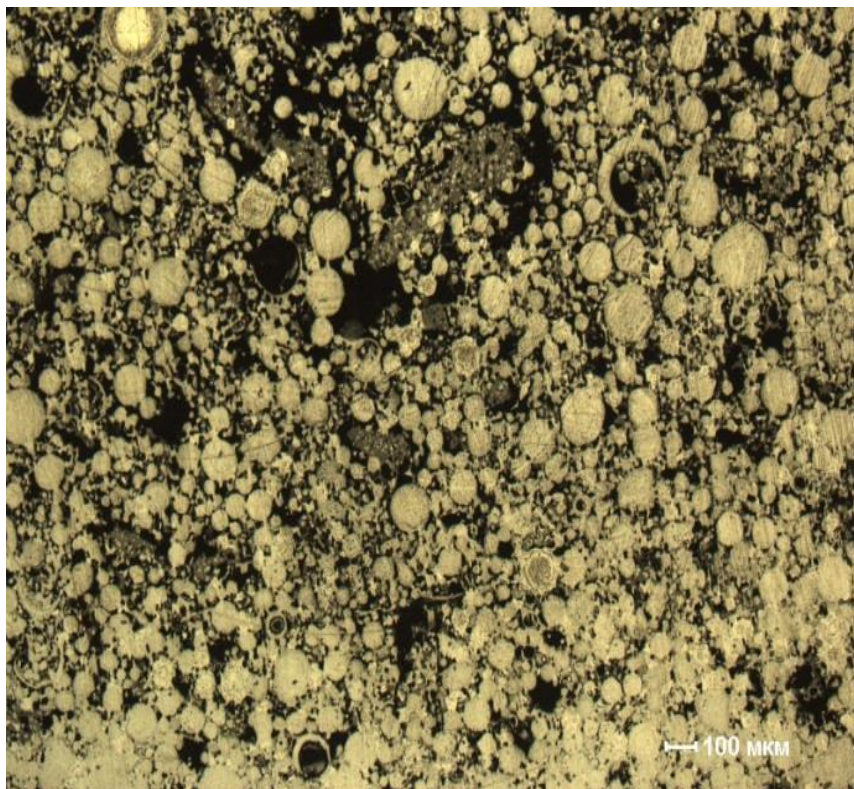
Рисунок 4.13 – Элементный состав поверхности спеченного порошкового материала

Таблица 4.11 – Элементный состав поверхности спеченного порошкового материала, полученного в воде дистиллированной из ШХ15

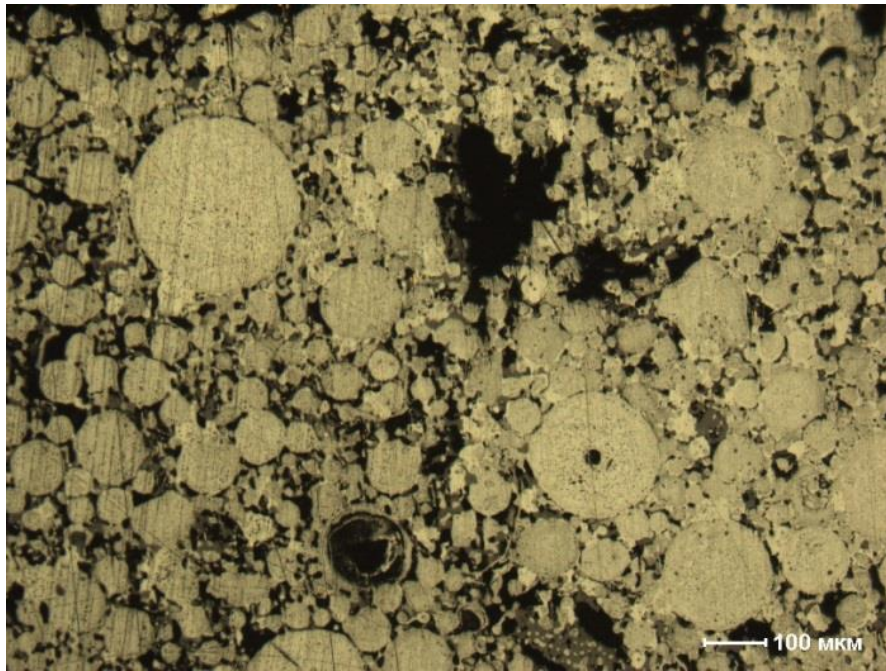
Элемент	C	O	Si	Cr	Fe	Итого
Массовая доля, %	8,70	0,82	0,58	1,76	88,14	100,00
Атомарная доля, %	30,08	2,13	0,86	1,40	65,51	100,00

Поверхность образца шлифовали и полировали. Шлифование производили металлографической бумагой с крупным (№№ 60-70) и мелким зерном (№№ 220-240). В процессе шлифования образец периодически поворачивали на 90°. В процессе шлифования зафиксирована рыхлость краев

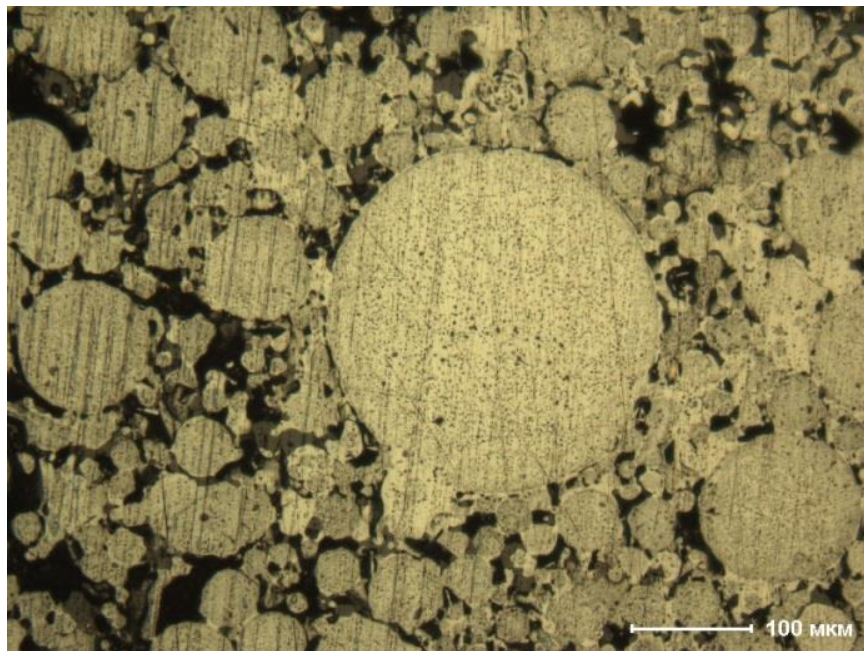
образцов, которая приводила к откалыванию частиц и разрушению поверхности шлифа. Оставшиеся частицы абразива смывали водой и полировали на круге суспензиями из оксидов металлов (Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , Al_2O_3). После достижения зеркального блеска, поверхность шлифа промывали водой, спиртом и просушивали фильтровальной бумагой. Для травления шлифов, изготовленных из образцов, их погружали на несколько секунд в раствор. После травления поверхность промывали водой, спиртом и сушили с помощью фильтровальной бумаги. Для травления стали использовали реактив следующего состава: 5 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте (реактив Ржешотарского).



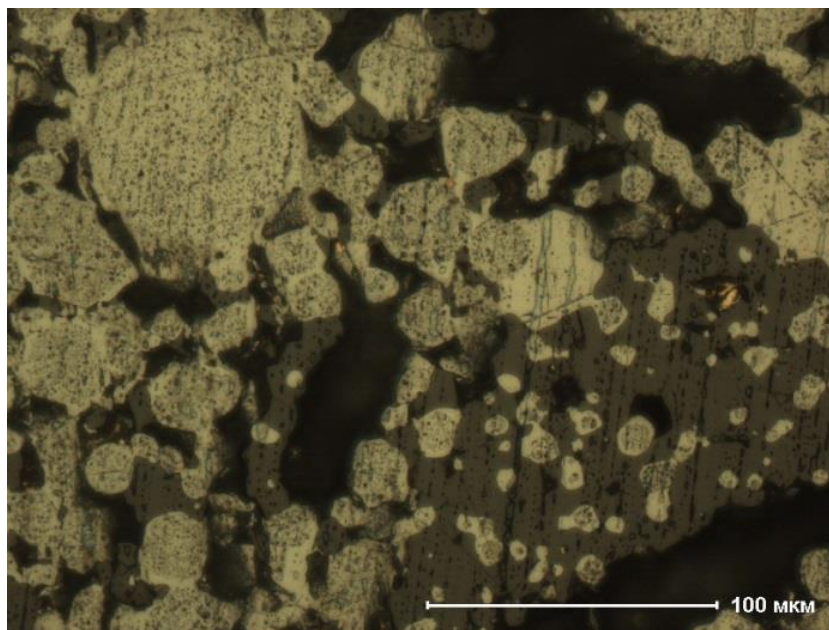
a)



б)

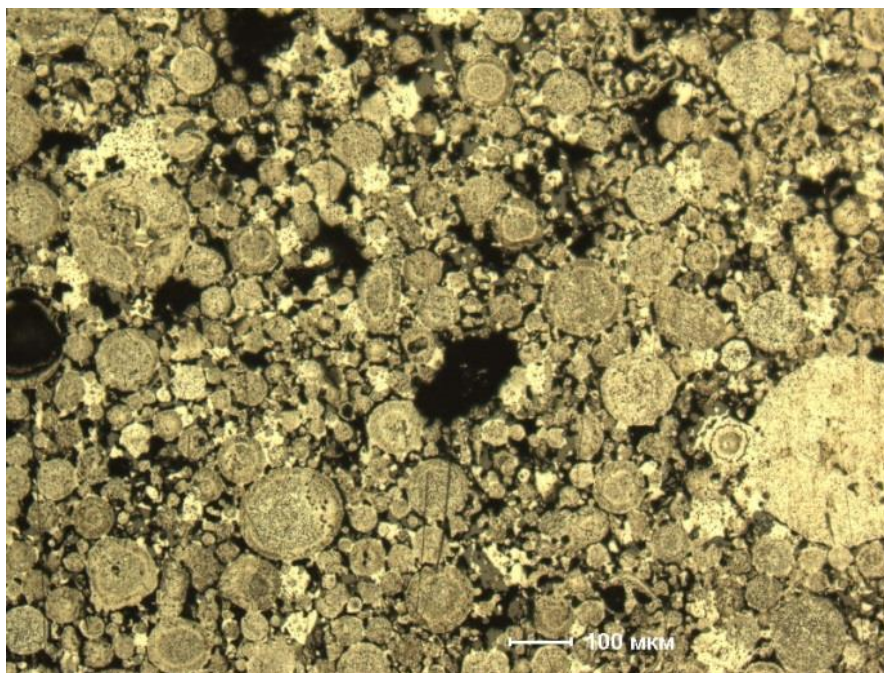


в)



г)

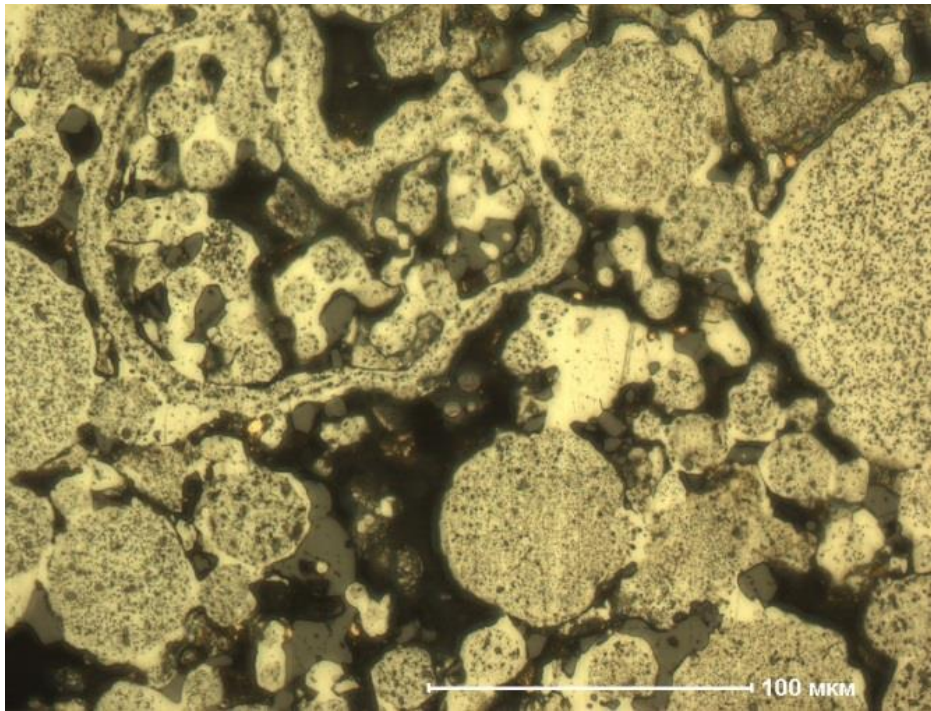
Рисунок 4.14 – Микроструктура спеченного порошкового материала ШХ до травления реактивом Ржешатарского (снимок с оптического микроскопа): а) участок 1; б) участок 2; в) участок 3; участок 4



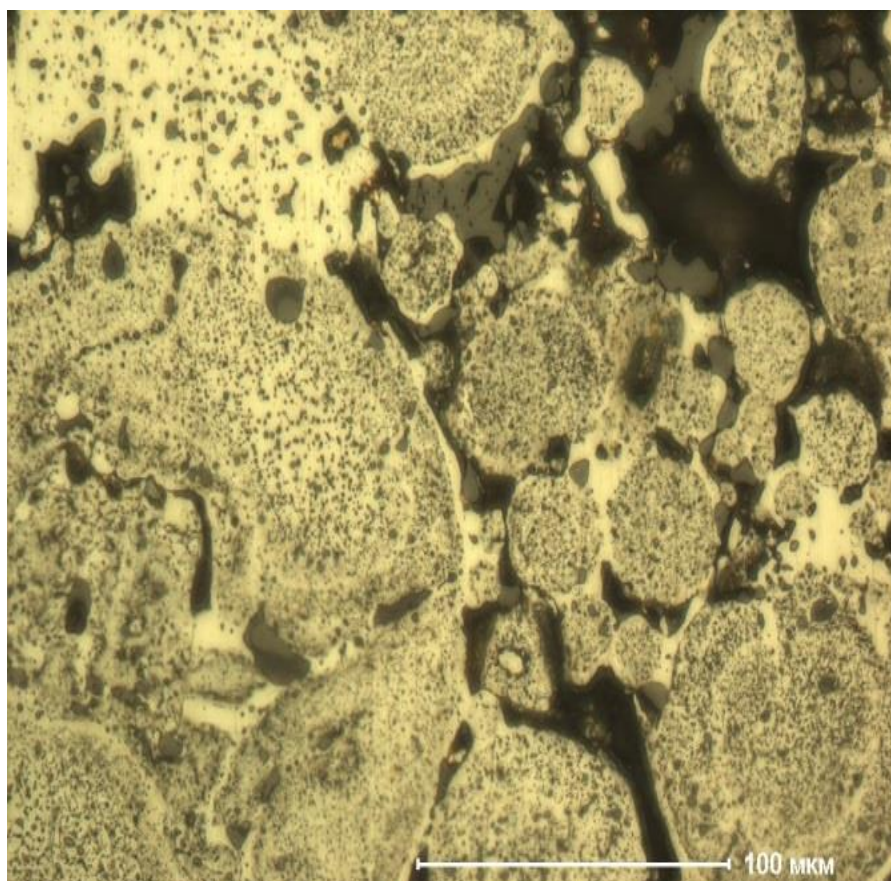
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.15 – Микроструктура спеченного порошкового материала ШХ после травления реактивом Ржешатарского (снимок с оптического микроскопа): а) участок 1; б) участок 2; в) участок 3; участок 4

4.8 Исследование микротвердости спеченных образцов

При помощи системы автоматического анализа микротвердости DM-8 по методу микро-Виккерса проводили испытания твердости образца точно по плоскости и поперечному шлифу при нагрузке в индентор 50 г по 10 следам со свободным выбором участка укола по соответствию с ГОСТом 9450-76 (Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников) [111].

Индентор нагружали в течение 15 секунд. Все результаты измерений сведены в таблицу 4.12.

Таблица 4.12 – Микротвердость по Виккерсу

Твердость по Виккерсу	Спеченный образец
1	152
2	146
3	141
4	139
5	143
6	144
7	149
8	136
9	112
HV	154
ГПа	44,63

Фотография отпечатка приведена на рисунке 4.16.

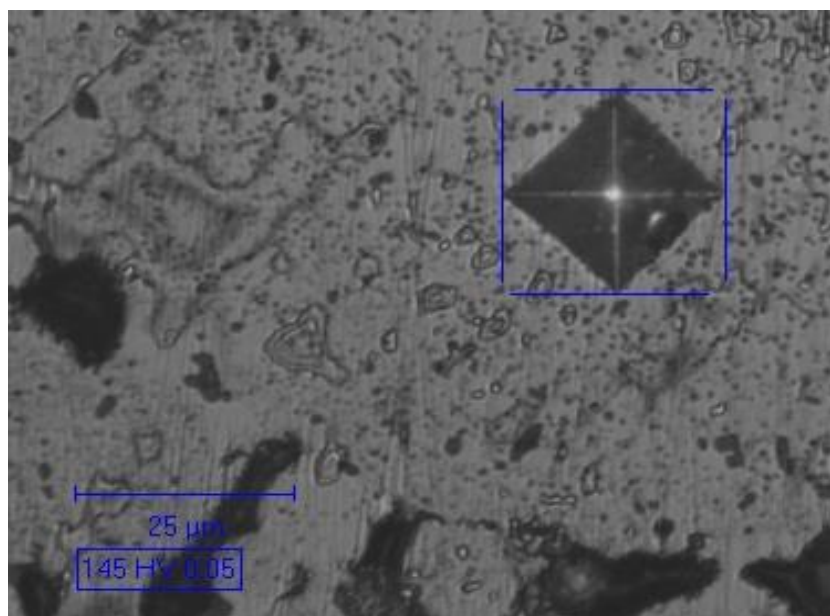


Рисунок 4.16 – Снимок отпечатка

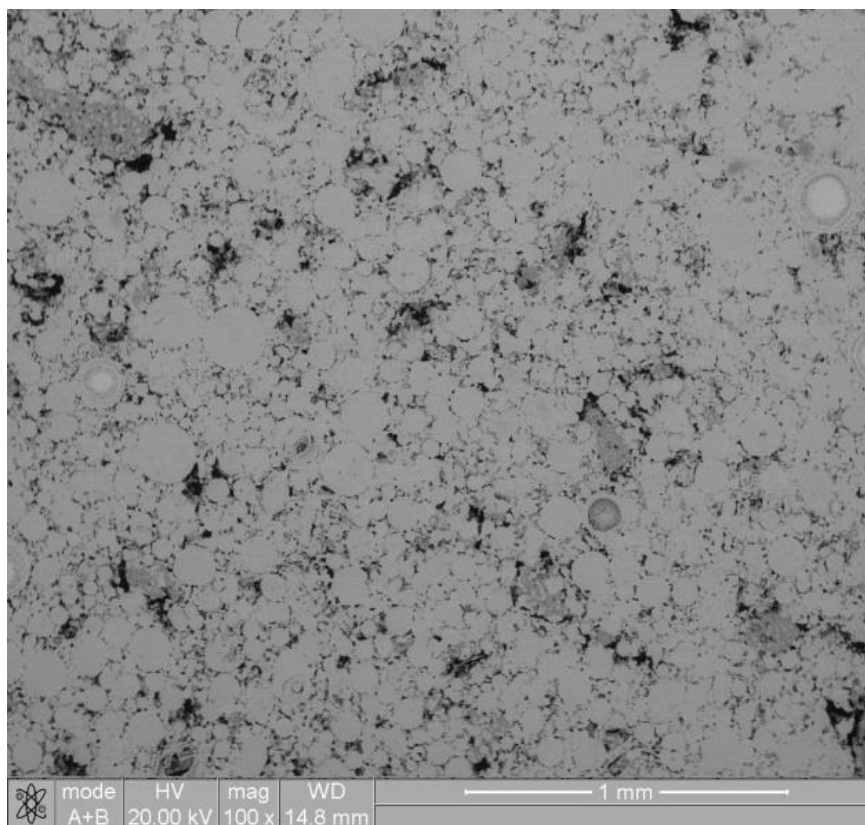
Определено то, что средняя величина микротвердости спеченных образцов из порошковых материалов, которые были получены электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 в воде дистиллированной, составляет 154 HV (77 HRB).

4.9 Исследование пористости спеченных образцов

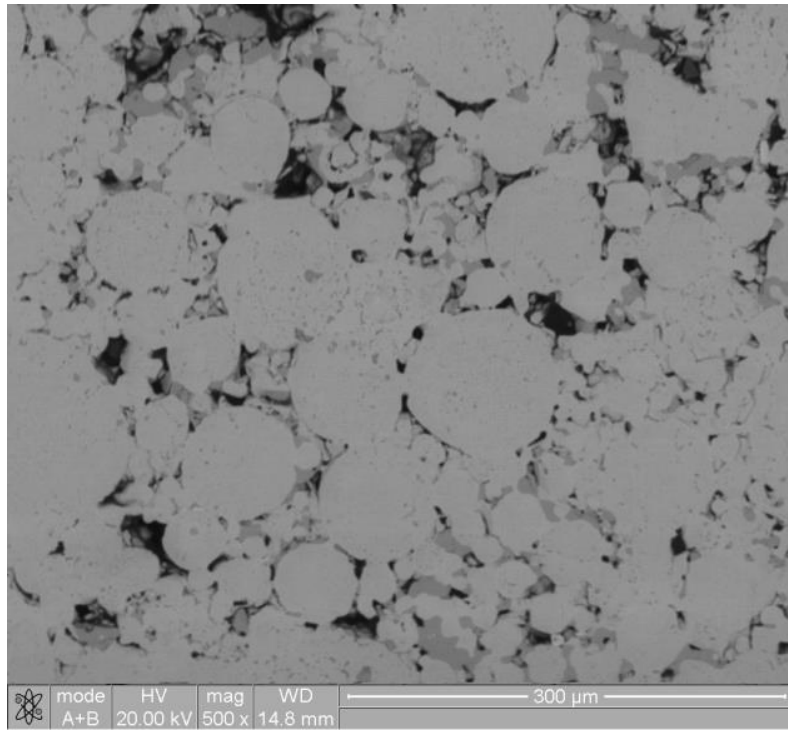
Результаты исследования пористости образца ШХ в воде (по поперечному шлифу) металлографическим методом приведены в таблице 4.13 и на рисунках 4.17, 4.18 [110].

Таблица 4.13 – Пористость спеченного порошкового материала (металлографический метод)

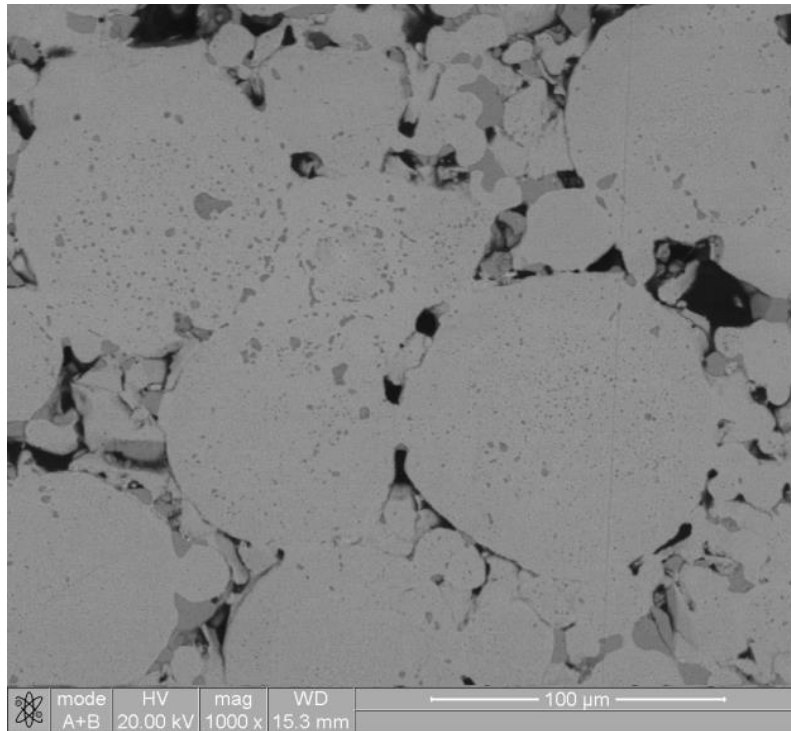
Наименование	Площадь анализа, кв, мкм	Пористость, %	D_{min} , мкм	D_{max} , мкм	D_{med} , мкм
ШХ в воде	63660,2	1,72	0,1	9,8	0,1



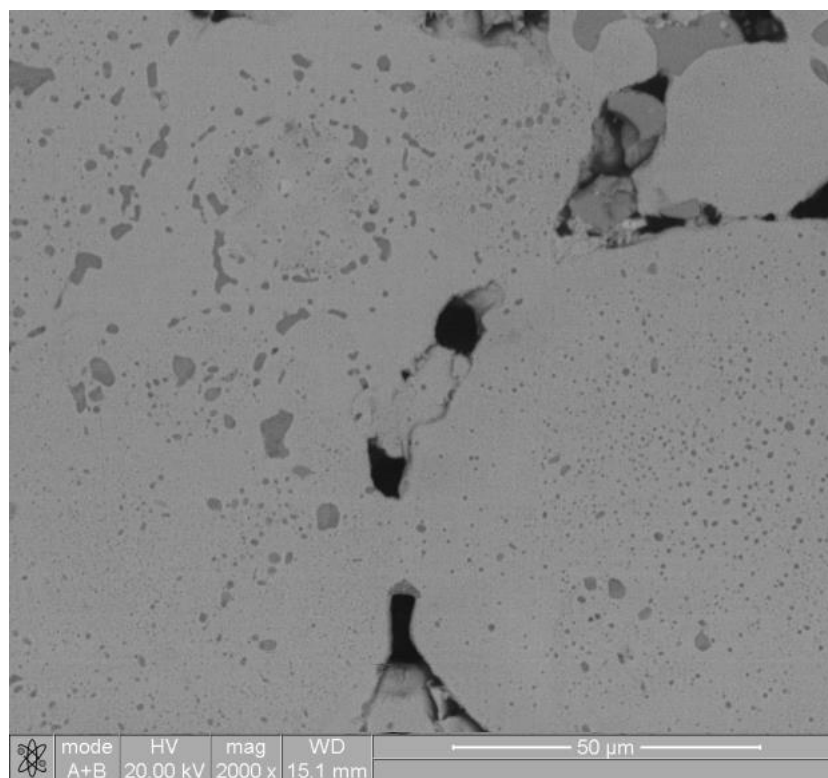
a) x100



б) x500

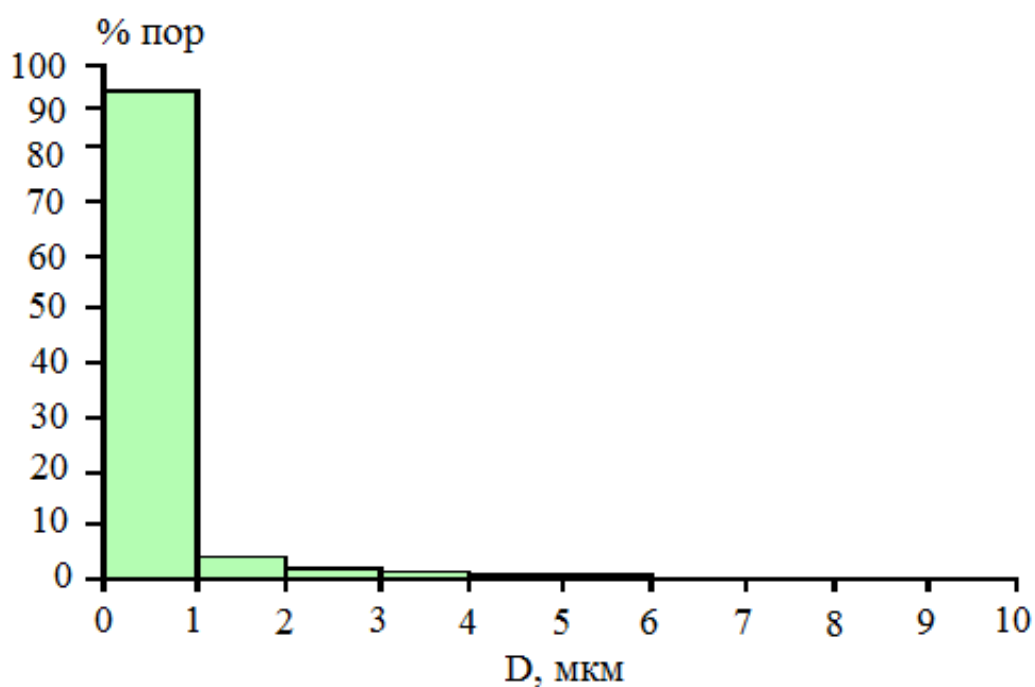


в) x1000



г) x2000

Рисунок 4.17 – Микроструктура поперечного шлифа спеченного образца из порошкового материала ШХ15: а) участок 1; б) участок 2; в) участок 3; участок 4



б)

Рисунок 4.18 – гистограмма распределения пор по размеру в поперечном шлифе спеченного образца из порошкового материала ШХ15

Установлено, что пористость спеченного образца стали ШХ15 равна 1,72%, а так же, что 90% пор имеют размер до 1 мкм.

4.10 Исследование предела прочности при изгибе спеченного образца

Результаты исследования предела прочности при изгибе спеченного образца представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Предел прочности при изгибе спеченного образца, МПа

Параметр	Предел прочности при изгибе спеченного образца, МПа
Среднее значение	550

Отмечено, что спеченный образец ШХ15, изготовленный методом изостатического прессования 250 МПа и последующим спеканием при температуре равной 1250°C в течении 2 часов в аргоновой газовой среде из порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 в воде дистиллированной, имеет предел прочности при изгибе 550 МПа.

4.11 Выводы к главе 4

1. В результате проведенных исследований установлено, что в порошковом материале, полученном в воде дистиллированной, удельная площадь поверхности 36844,32 см²/см³, средний размер частиц 5,88, коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 2,16 мкм составляет 2,49.

Установлено, что в порошковом материале, полученном в керосине осветительном, удельная площадь поверхности 5012,6 см²/см³, средний размер частиц 36,53, коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 27,49 мкм составляет 2,32.

2. Проведен рентгеноспектральный анализ порошковых материалов. Установлено, что порошковые материалы, полученные методом ЭЭД из отходов шарикоподшипниковой стали, на поверхности содержат большую часть железа, хрома, кислорода и углерода. Видно, что диспергирование в разных рабочих жидкостях влияет на элементный состав порошка.

3. Фазовый состав порошка полученного методом ЭЭД определяется природой РЖ. Диспергирование отходов шарикоподшипниковой стали в кислородсодержащей жидкости (дистиллированной воде) способствует

образованию оксидов: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Диспергирование сплавов отходов шарикоподшипниковой стали в керосине осветительном привело к обогащению углеродом и образованию фазы Fe_3C .

4. Проведено исследование микроструктуры спеченного образца ШХ15. Установлено, что пористость спеченного образца стали ШХ15 равна 1,72%, а так же, что 90% пор имеют размер до 1 мкм.

5. Дальнейшие исследования спеченного образца показали, что средняя микротвердость составляет 154 HV; основными элементами являются Fe, C, Cr, Ni.

6. Проведено исследование предела прочности при изгибе спеченного образца. Установлено, что спеченный образец ШХ15, изготовленный методом изостатического прессования 250 МПа и последующего спекания в течение 2 часов при температуре 1250°C в среде аргона из порошковых материалов, имеет предел прочности при изгибе 550 МПа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан способ получения порошкового материала, отличающийся тем, что проводят электроэрозионное диспергирование отходов шарикоподшипниковой стали в дистиллированной воде при напряжении на электродах 90-110 В, емкости разрядных конденсаторов 40-75 мкФ и частоте следования импульсов 95-105 Гц.

2. Исследовано влияние электрических параметров установки ЭЭД на гранулометрический состав порошковых материалов. Экспериментально установлены обратно пропорциональные зависимости среднего размера частиц порошкового материала от ёмкости разрядных конденсаторов и от напряжения на электродах реактора. Также установлена обратно пропорциональная зависимость среднего размера частиц порошкового материала от частоты следования импульсов установки ЭЭД в интервале до 90 Гц. Дальнейшее увеличение ёмкости разрядных конденсаторов приводит к увеличению среднего размера частиц порошкового материала. Определены оптимальные электрические параметры установки ЭЭД для диспергирования отходов шарикоподшипниковой стали: ёмкость разрядных конденсаторов 48 мкФ, напряжение на электродах 100 В, частота следования импульсов 100 Гц.

3. Исследованы строение и свойства порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде дистиллированной и керосине осветительном:

- удельная площадь поверхности частиц составляет $36844,32 \text{ см}^2/\text{см}^3$ и $5012,6 \text{ см}^2/\text{см}^3$ соответственно;
- средний размер частиц составляет 5,88 мкм и 36,53 мкм соответственно;
- коэффициент элонгации (удлинения) частиц составляет 2,49 и 2,32 соответственно;
- растровой электронной микроскопией установлено, что порошковый материал состоит из частиц правильной сферической формы (или эллиптической) и неправильной

формы (конгломератов);

– рентгеноспектральным микроанализом установлено, что порошковый материал на поверхности содержит большую часть железа, хрома, кислорода и углерода. Отмечено, что рабочая жидкость влияет на элементный состав порошка, полученного электроэрозионным диспергированием. Установлено, что диспергирование в дистиллированной воде способствует повышению количества кислорода, а диспергирование в осветительном керосине способствует повешению количества углерода в порошковом материале;

– рентгеноструктурный анализ показал, что на фазовый состав порошковых материалов, полученных методом ЭЭД, влияет комплекс термохимических свойств рабочей жидкости..

4. Исследованы свойства спеченных образцов из порошковых материалов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде дистиллированной:

– анализ микроструктуры показал, что пористость спеченного образца составляет 1,72%, при этом 90% пор имеют размер до 1 мкм;

– среднее значение микротвердости составляет 154 HV;

– среднее значение предела прочности при изгибе составляет 550 МПа.

5. Исследовано влияние свойств порошкового материала, полученного электроэрозионным диспергированием шарикоподшипниковой стали, на его спекаемость. Отмечено, что порошковые материалы, полученные в среде керосина, имеют значительное количество свободного углерода и не подвергаются спеканию. К практическому применению рекомендуются порошковые материалы, полученные электроэрозионным диспергированием отходов ШХ15 в дистиллированной воде.

6. Результаты проведенного исследования апробированы на промышленном предприятии ООО «Росутилизация46». Внедрение предложенных решений позволило получить экономический эффект свыше 2 млн. руб. в год.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 . Конструкционные стали и сплавы: учеб, пособие / Г.А. Воробьева; Балл. гос. техн. ун-т. — СПб., 2008.-369 с.
2. Гольдштейн М.И. Специальные стали. Учебник для вузов / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер // Металлургия. 1985. 408 с.
3. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. // Под общей ред. А.С. Зубченко. Машиностроение. 2003. 784 с.
4. Мухин В.В. Машиностроение. Энциклопедия. Т.2-2. Стали. Чугуны / В.В. Мухин, Г.Г. Беляков, А.И. Александров, Н.Н. и др.; Под общ. ред. О.А. Банных, Н. Н. Александрова // Машиностроение. 2001. 780 с.
5. Колосков М.М. Марочник стали и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Кашировский и др.; Под общей ред. А.С. Зубченко // Машиностроение. 2001. 784 с.
7. Сорокин В.Г. Стали и сплавы. Марочник / В.Г. Сорокин // Интернет Инжиниринг. 2001. 608 с.
8. Береснев А.Г. Порошковые и гранульные материалы / Береснев А.Г., Разумовский И.М., Логунов А.В., Логачева А.И. // Технология металлов. 2009. № 12. С. 24-37.
9. Рудской А.И. Ультрамелкозернистые металлические материалы / Рудской А.И., Коджаспиров Г.Е. // монография. Санкт-Петербург, 2015.
10. Котов Ю.А. Установка для получения высокодисперсных порошков металлов, сплавов и их химических соединений методом электрического взрыва проволоки / Котов Ю.А., Бекетов И.В., Саматов О.М. // патент на изобретение RUS 2149735 06.10.1998

11. Новиков А.В. Способ получения ультрадисперсного металлического порошка / Новиков А.В., Новиков С.А., Гуреев А.К. // патент на изобретение RUS 2170647 02.11.2000

12. Дудина Д.В. Электроискровое спекание смесей металлических порошков и композитов с металлическими матрицами: особенности формирования структуры и свойства спеченных материалов / Дудина Д.В. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 2 (75). С. 45-54.

13. Крохалев А.В. О возможности получения твердых сплавов из смесей порошков карбидов с металлами взрывным прессованием без спекания / Крохалев А.В., Харламов В.О., Тупицин М.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2017. № 2. С. 22-30.

14. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии / Рудской А.И. // Санкт-Петербург, 2007.

15. Рожкова Т.В. Исследование новых способов электроконтактного спекания порошковых материалов / Рожкова Т.В. // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. 2016. № 2 (33). С. 122-129.

16. Dubrovskii V.A. Electric resistance surfacing with a wire and with melting of the metals to be joined / Dubrovskii V.A., Bulychev V.V. // Welding International. 1998. Т. 12. № 7. С. 570-572.

17. Булычев В.В. Оценка влияния температуры электроконтактной приварки порошкового слоя на его пористость / Булычев В.В., Латыпова Г.Р., Латыпов Р.А., Бахмудкадиев Н.Д. // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 3 (3). С. 53-58.

18. Пат. 2033312 Российская Федерация, МПК В22F9/02 С22В7/00. Способ получения стального порошка и стружки из отходов металлообрабатывающих производств и установка для его осуществления / Безумов В.Н., Кремнев Ю.П., Кокоулин Г.П., Вулих А.Х. // заявитель и патентообладатель АО «Научно-производственное объединение «РОСТ». – № 2015109483/02; заявл. 19.10.1992; опубл. 20.04.1995, Бюл. 25.

19. Пат. 2569291 Российская Федерация, МПК С22В7/00 В22F9/04. Способ получения стального порошка из отходов шлифования / Тамбовцев Ю.И. // заявитель и патентообладатель: «Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС". – № 2014121204/02, заявл. 20.11.2015; Бюл. 32.

20. Пат. 2014960 Российская Федерация, МПК В22F 9/04 (1990.01) В22F 1/00 (1990.01). Способ получения стального порошка из отходов шлифования / Тамбовцев Ю.И. // заявитель Тамбовцев Ю.И.; патентообладатель ООО «Производственно-коммерческая фирма «Эльдэн». – №4899756/02, заявл. 08.01.1991; опубл. 30.06.1994.

21. Высоцкий Т.В. Технологические процессы изготовления механически легированных порошковых сталей и изделий из них / Высоцкий Т.В., Высоцкий В.Т. // Вестник Белорусско-Российского университета. 2008. № 3. С. 58-65.

22. Агеев Е.В. Электродуговая наплавка лемехов плугов электроэрозионными материалами / Агеев Е.В., Алехин Ю.Г., Угримов А.С.// Интеграция науки и сельскохозяйственного производства: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – 2017. С. 68-72.

23. Серов А.В. Способ утилизации отходов из углеродистых, легированных и быстрорежущих инструментальных сталей

электроконтактной приваркой / Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И., Латыпов Р.А. // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 111-115.

24. Латыпов Р.А. Влияние среды электроэрозионного диспергирования на динамику накопления никель-хромовых порошков, применяемых в автомобильной промышленности /, Агеева Е.В., Зубарев М.А., Осьминина А.С. // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2016): сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. С. 231-235.

25. Латыпов Р.А. Рентгеноспектральный микроанализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 в бутаноле / Латыпов Р.А., Денисов В.А., Агеев Е.В. // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы - перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов: сб. науч. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. 2016. С. 286-289.

26. Агеев Е.В. Порошковые материалы для восстановления деталей машин, полученные электроэрозионным диспергированием в бутаноле / Агеев Е.В., Латыпов Р.А., Агеева Е.В., Угримов А.С. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 3. С. 20-21.

27. Латыпов Р.А. Электроэрозионные порошки микро- и нанометрических фракций для производства твердых сплавов / Латыпов Р.А., Агеева Е.В., Кругляков О.В., Латыпова Г.Р. // Электротехнология. 2016. № 1. С. 16-20.

28. Ageev E.V. Metallurgical features of the manufacture of hard-alloy powders by electroerosive dispersion of a T15K6 alloy in butanol // Ageev E.V., Ugrimov A.S., Latypov R.A. // Russian metallurgy (Metally). 2016. Т. 2016. № 12. С. 1155-1157.

29. Latypov R.A. Electroerosion micro- and nanopowders for the production of hard alloys / Latypov R.A., Latypova G.R., Ageeva E.V., Kruglyakov O.V. // Russian metallurgy (Metally). 2016. Т. 2016. № 6. С. 547-549.

30. Латыпов Р.А. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Латыпов Р.А., Агеев Е.В., Агеева Е.В., Новиков Е.П. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 19-22.

31. Серебровский В.И. Химико-термическая обработка электроосажденных покрытий / Серебровский В.И., Гнездилова Ю.П., Горюшкин А.С., Минаков Д.С. // Региональный вестник. 2016. № 2. С. 39-41

32. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. - М.: Машиностроение, 1986. - 384 с.

33. Левашов, Е.А. Особенности влияния нанокристаллических порошков на структуру и свойства сплава TiC-40%ХН70Ю, полученного методом СВС [Текст] / Е.А. Левашов, Е.С. Мишина, Б.Р. Сенатулин, А.Е. Кудряшов, Т.А. Свиридова, Ю.В. Благовещенский // Физика металлов и материаловедение. – 2003. – № 6. – С. 58-64. – ISSN: 0015-3230.

34. Агуреев, Л.Е. Влияние оксидных микродобавок на характеристики дисперсно-упрочненных порошковых материалов на основе алюминия / Л.Е. Агуреев, В.И. Костиков, Ж.В. Еремеева, С.В. Савушкина // Технология легких сплавов. – 2014. – № 3. – С. 59-66. – ISSN: 0321-4664.

35. Костиков, В.И. Алюмоматричные композиты с малыми добавками наночастиц оксидных материалов [Текст] / В.И. Костиков, Л.Е. Агуреев, Ж.В. Еремеева, Н.Н. Ситников, В.А. Казаков // Перспективные материалы. – 2014. – № 7. – С. 13-20. – ISSN: 1028-978X.

36 Вараксин, А.В. Получение наноразмерных и ультрадисперсных порошков металлов и их карбидов электрохимическим способом / А.В.

Вараксин, В.А. Костылев, В.Л. Лисин, Л.И. Леонтьев, Р.Г. Захаров, С.А. Петрова // Бутлеровские сообщения. – 2014. – № 1. – С. 76-83. – ISSN: 2074-0212.

37. Щеглов, П.А. Перспективная технология металлических и оксидных наноматериалов на основе редких элементов / П.А. Щеглов, Е.Е. Никишина, Д.В. Дробот, Е.Н. Лебедева // Нано- и микросистемная техника. – 2006. – № 11. – С. 15-18. – ISSN: 1813-8586.

38. Лазаренко Б.Р. Электрическая эрозия металлов / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко // Л.: Госэнергоиздат, 1944. 28 с.

39. Лазаренко Б.Р. Современный уровень электронской обработки и некоторые научные проблемы в этой области / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко // Электронская обработка металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Вып. 1. С. 9–37.

40. Золотых Б.Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б.Н. Золотых, Р.Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. 42 с.

41. Золотых Б.Н., Коробова И.П., Стрыгин Э.М. О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде / под ред. Б.А. Красюкова // Физические основы электронской обработки материалов. М.: Наука, 1966. С. 68–72.

42. Золотых Б.Н. Тепловые процессы на поверхности электродов при электронской обработке металлов / Б.Н. Золотых, А.И. Круглов // Проблемы электрической обработки материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 65–85.

43. Верхотуров А.Д. Физико-химические основы процесса электронского легирования металлических поверхностей / А.Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1992. 180 с.

44. Агеева Е.В. Исследование распределения частиц твердосплавного электроэрозионного порошка по размерам / Агеева, Е.В. Агеев, Б.О. Роик // Dny vědy - 2013: materiály IX Mezinárodní vědecko-praktická konference: D. 34. Technická vědy. – Praha, 2013. – С. 6–8.

45. Линёв А.С. Повышение эффективности электроэрозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов / А.С. Линёв, М.Ю. Сариков // Metallurgiya mashinostroyeniya. 2016. № 3. С. 29-31.

46. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления / К.К. Намитоков. – М.: Энергия, 1978. 456 с.

47. Калинин А.В. Особенности плазмохимического синтеза нанодispersных порошков / А.В. Калинин // Металознавство та термічна обробка металів. 2015. № 3 (70). С. 26-30.

48. / Громов В.Е. Изменение структуры, тонкой структуры и фазового состава при деформации закаленной конструкционной стали / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, Е.В. Корнет // Актуальные проблемы прочности: сб. тр. XLVIII Междунар. конф. – 2009. – С. 35-37.

49. Орданьян С.С. Регенерированные твердые сплавы для изготовления износостойких изделий / С.С. Орданьян, И.Б. Пантелеев, В.Л. Гиршов // Metalloobrabotka. 2007. № 6. С. 42-46. 0

50. Коняев А.Ю. Особенности электродинамической сепарации мелкой фракции твердых бытовых отходов / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, Д.Н. Багин, И.А. Коняев // Экология и промышленность России. 2017. № 6. С. 4-9.

51. Богодухов С.И. Химико-термическая обработка твердых сплавов группы ВК / С.И. Богодухов, Е.А. Шеин, А.С. Ясаков, В.С. Гарипов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10 (129). С. 221-226.

52. Пустов Ю.А. Изучение причин разрушения дентальных сплавов титана, кобальта и золота в условиях, моделирующих режимы эксплуатации. Ч. 1. Влияние параметров биологической среды на коррозионно-электрохимическое поведение сплавов // Ю.А. Пустов, А.В. Кутузов, М.Р. Филонов // Коррозия: материалы, защита. 2008. № 7. С. 10-18.

53. Кривочуров Н.Т. Физико-химические основы управления составом и свойствами износостойких слоев на поверхностях восстанавливаемых деталей / Кривочуров Н.Т., Миронов В.В., Зудилов Д.С., Ишков А.В. // Ползуновский вестник. 2010. № 3. С. 197-200.

54. Поварова К.Б. Порошковые сплавы NIAL. I. Получение порошков NIAL / К.Б. Поварова, О.А. Скачков, Н.К. Казанская, А.А. Дроздов, А.Е. Морозов, О.Н. Макаревич // Металлы. 2011. № 5. С. 68.

55. Левин Д.М. Особенности изменения параметров структуры и фазового состава при старении закаленных порошковых тпси сплавов / Д.М. Левин, С.Е. Кажарская // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. № 1. С. 91-101.

56. Тесакова М.В. Физико-химические свойства ультрадисперсных медьсодержащих порошков, полученных электрохимическим методом / Тесакова М.В., Парфенюк В.И. // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2010. Т. 53. № 5. С. 106-110

57. Урханова Л.А. Влияние углеродного наномодификатора на изменение фазового состава, структуры и свойств цементных композитов / Л.А. Урханова, С.А. Лхасаранов, А.А. Миняева, А.П. Семенов, Н.Н. Смирнягина // Вопросы материаловедения. 2015. № 3 (83). С. 114-121.

58. Назаренко О.Б. Влияние добавок активного газа на дисперсность электровзрывных нанопорошков металлов / Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 10. С. 25-29.

59. Гаврилов Г.Н. Лазерные технологии повышения стойкости прокатных валков / Гаврилов Г.Н., Костромин С.В., Калинин А.Б., Пейганович В.Н., Ермаков Д.Ю. // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 76.

60. Линник А.А. Влияние наноразмерных порошков карбида вольфрама на структуру и свойства металла шва / А.А. Линник, А.С. Панкратов, Н.В. Коберник // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 6. С. 66-71.

61. Курлов А.С. Фазовые превращения в низшем карбиде вольфрама W_2C / А.С. Курлов, А.И. Гусев // Доклады Академии наук. 2007. Т. 417. № 5. С. 616-623.

62. Серебровский В.И. Использование электроосажденных сплавов на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин / Серебровский В.И., Серебровский В.В., Блинков Б.С., Калущкий Е.С. // Региональный вестник. 2016. № 1. С. 41-43.

63. Авсеевич О.И. О закономерностях электрической эрозии бинарных сплавов системы «медь – цинк» при импульсных разрядах / О.И. Авсеевич, И.Г. Некрашевич // Физические основы электроискровой обработки материалов. М.: Наука, 1966. С. 109–117.

64. Дикусар А.И. Физические основы получения абразивных электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах / А.И. Дикусар, В.И. Юрченко, В.А. Юрченко, В.М. Фомичев, В.И. Агафий // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2012. Т. 3. № 3 (42). С. 54-60.

65. Гадалов В.Н. Повышение работоспособности и качества коленчатых валов, восстановленных газоплазменным напылением ультразвуковой обработкой / Гадалов В.Н., Серебровский В.И., Абакумов

А.В., Савельев В.И., Ворначева И.В. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 6. С. 8-10.

66. Bulychev V.V. Determination of the strength of the joint in homogeneous metals in electric resistance welding / Bulychev V.V., Latypov R.A. // Welding International. 2013. Т. 27. № 7. С. 553-556.

67. Ефанов А.В. Тиристорные преобразователи и дискретные устройства управления / А.В. Ефанов, С.В. Никитченко // Невинномысск, 2004.

68. Лившиц А.Л. Импульсная электротехника / А.Л. Лившиц, М.Ш. Отто. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.

69. Чебовский О.Г. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник / О.Г. Чебовский [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

70. Костиков В.И. Алюмоматричные композиционные материалы, полученные в нестационарном силовом поле и упрочненные наноразмерными добавками / В.И. Костиков, В.Ю. Лопатин, Ж.В. Еремеева, Е.В. Агеев, Н.А. Капуткина, Е.В. Симонова, Ю.Ю. Капланский // Известия ЮЗГУ. – 2015. – № 2 (59). – С. 26-34.

71. Панов В.С. Влияние природы наноразмерных частиц, способа смешивания, температуры и времени спекания на твердость порошковой стали 70П / В.С. Панов, Ж.В. Еремеева, Р.А. Скорилов, Г.В. Михеев, Е.В. Агеев // Известия ЮЗГУ. – 2014. – № 3 (54). – С. 90–98.

72. Немилов Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Е.Ф. Немилов – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 164 с.

74. Коростелёв А.Б. Повышение трибологических свойств изделий из порошковых сталей после многокомпонентного диффузионного насыщения / Коростелёв А.Б., Чумак-Жунь Д.А. // Metallurg. 2008. № 9. С. 70-73.

75. Ларичев М.Н. О возможности практического использования реакции окисления дисперсного алюминия жидкой водой / Ларичев М.Н., Ларичева О.О., Шайтура Н.С., Школьников Е.И. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2012. № 3. С. 66-79.

76. Богодухов С.И. Проектирование экспертной системы для изделий из порошковых низколегированных сталей / Богодухов С.И., Проскурин А.Д., Северюхина Н.А. // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 1 (120). С. 187-191.

77. А.с. 1274124 СССР. Импульсный источник питания для установок электроэрозионного диспергирования металлов / А.Н. Милях, А.А. Щерба, В.А. Муратов, С.А. Попсуевич, Н.И. Шевченко // Бюл. – 1986. – № 44.

78. Соловьев В.В. Анализ гранулометрического состава порошка цветных металлов полученных электроэрозионным диспергированием /Соловьев В.В. // Развитие инструментов управления научной деятельностью: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф.. 2017. С. 108-110.

79. Yshibashi, W. Method of producing pure Alumina by Spark Discharge Process and the Characteristics There of / Yshibashi W., Araki T., Kisimoto K., Kuno H. – Ceramics Japan, 1971. – № 6. – P. 461-468.

80. Yshibashi W. Method of producing pure Alumina by Spark Discharge Process and the Characteristics There of / W. Yshibashi, T. Araki, K. Kisimoto, H. Kuno. – Ceramics Japan, 1971. № 6, p. 461-468.

81. Зыбин И.Н. Анализ энергии границ зерен в металлах применительно к процессу соединения металлов при сварке давлением / Зыбин И.Н., Булычев В.В., Latypov R.A. // Современные проблемы науки и

образования. 2015. № 1-1. С. 402.

82. А. с. 70000 СССР. Способ получения порошков и устройство для его осуществления / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко // Бюл. – 1964. – № 22. – 102с.

83. А. с. 322249 СССР. Установка для получения продуктов электроэрозии металлов / У.А. Асанов, Б.Я. Петренко, А.С. Денисов // –Бюл. – 1971. – №36.

84. А. с. 956153 СССР. Установка для получения порошков электроэрозионным диспергированием / Л.П. Фоминский // Бюл. – 1982 – №33.

85. Ватари И. Получение металлических порошков методом электроискрового разряда / И. Ватари // Киндзоки, Киндзоку. 1977. № 11. С. 20–22.

86. ГОСТ 6709–72. Вода дистиллированная. Технические условия . Введ. 1974–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1974. – 11 с.

87. ГОСТ 18499-73. Керосин для технических целей. Технические условия. . Введ. 1973–03–23. М.: Изд-во стандартов, 1974. – 5 с.

88. Пат. 2449859, Российская Федерация, С2, В22F9/14. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Агеев Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2010104316/02; заяв. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012. – 4 с.: ил.

89 Мелешин В. Транзисторная преобразовательная техника. Перспективные направления / В. Мелешин // Электроника: Наука, технология, бизнес. 1998. № 5-6. С. 9-16.

90. Агеева Е.В. Исследование гранулометрического состава частиц порошковой шарикоподшипниковой стали, полученной электроэрозионным

диспергированием / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, С.В. Хардигов, П.В. Чаплыгин // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2014. – №4. – С. 23–28.

91. Латыпов Р.А. Перспективы применения шарикоподшипниковой стали при восстановлении и упрочнении деталей автомобилей / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, С.В. Хардигов // Современные автомобильные материалы и технологии: сб. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2014. – С. 82–91.

92. Хардигов С.В. Микроскопический анализ диспергированной шарикоподшипниковой стали / С.В. Хардигов, Е.В. Агеева, Е.В. Агеев // Современные материалы, техника и технология. Материалы 4-ой Междунар. науч.-тех. конф. – Курск, 2014. – С. 460–462.

93. Хардигов С.В. Изучение фазового состава порошковой шарикоподшипниковой стали / С.В. Хардигов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. тр. XII-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2015. – С. 193–196.

94. Агеев Е.В. Электроэрозионное диспергирование шарикоподшипниковой стали до микро- и нанодисперсий / Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, С.В. Хардигов, С.В. Пикалов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: матер. XII Междунар. науч. конф. – Усть-Каменогорск, 2015. – С. 45–50.

95. Агеев Е.В. Электроэрозионное диспергирование – перспективная технология переработки выбракованных подшипников / Е.В. Агеев, С.В. Хардигов, С.В. Пикалов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования: сб. науч. тр. ежегод. конф. – Том 2, вып. 1 – Воронеж, 2015. – С. 314 – 318.

96. Агеев Е.В. Электроэрозионное диспергирование шарикоподшипниковой стали до микро- и нанодисперсий / Е.В. Агеев, С.В. Пикалов, С.В. Хардинов, А.Ю. Алтухов // Физика и технология наноматериалов и структур: сб. науч. тр. 2-ой Междунар. науч.-практ. конф. в 2 т. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – Т. 1. – С. 16–25.

97. Хардинов С.В. Электроэрозионная шарикоподшипниковая сталь, полученная методом ЭЭД в бутиловом спирте / С.В. Хардинов, Е.В. Агеев // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2015): сб. ст. VII Междунар. науч.-тех. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – С. 238–242.

98. Хардинов С.В. Утилизация изношенных автомобильных подшипников методом электроэрозионного диспергирования / С.В. Хардинов // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: сб. ст. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. / Орел, 2016 г. – С. 87–91.

99. Хардинов С.В. Нанопорошок шарикоподшипниковой стали / С.В. Хардинов, Е.В. Агеев // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования: сб. науч. тр. ежегод. конф. – Том 3, вып. 2 – Воронеж, 2016. – С. 74 – 76.

100. Агеева Е.В. Изучение динамики накопления электроэрозионных порошков, полученных в водной среде из отходов шарикоподшипниковой стали / Е.В. Агеева, А.С. Осьмина, С.В. Хардинов // Прогрессивные технологии и процессы: сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – С. 10–14.

101. Латыпов Р.А. Исследование влияния рабочей жидкости на элементный состав порошка стали ШХ15, полученного электроэрозионным

диспергированием / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, С.В. Хардилов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 11. – С. 29-33.

102. Агеева Е.В. Исследование влияния электрических параметров установки ЭЭД на гранулометрический состав порошка стали ШХ15 / Е.В. Агеева, С.В. Хардилов, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеев // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 4. – С. 24–31.

103. Агеева Е.В. Проведение рентгеноспектрального микроанализа порошка шарикоподшипниковой стали / Агеева Е.В., С.В. Хардилов, Агеев Е.В. // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 2. – С. 17–20.

104. Агеев Е.В. Рентгеноспектральный анализ порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в керосине осветительном / Е.В. Агеев, С.В. Хардилов // Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов: матер. XII Междунар. науч. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. – С. 17–20.

105. Агеева Е.В. Рентгеноструктурный анализ порошковой шарикоподшипниковой стали, полученной методом электроэрозионного диспергирования / Е.В. Агеева, С.В. Хардилов, С.В. Пикалов, Е.В. Агеев // Известия ЮЗГУ. – 2015. – № 3 (60). С. 35-39.

106. Агеев Е.В. Исследование производительности процесса ЭЭД при получении порошковой шарикоподшипниковой стали / Е.В. Агеев, С.В. Хардилов, А.Ю. Алтухов // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2017. – № 1. – С. 21–27.

107. Хардилов С.В. Исследование влияния частоты следования импульсов процесса ЭЭД отходов ШХ15 на гранулометрический состав порошка / С.В. Хардилов, Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова // Перспективное

развитие науки, техники и технологий: сб. науч. ст. VI-ой Междунар. науч.-практ. конф. . Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – С. 152–157.

108. Хардигов С.В. Исследование влияния напряжения на гранулометрический состав порошка ШХ15 / С.В. Хардигов, Г.Р. Латыпова, Е.В. Агеева // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2016): сб. ст. VIII Междунар. науч.-тех. конф. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – С. 424–429.

109. Латыпов Р.А. Рентгеноспектральный микроанализ спеченной стали из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов стали ШХ15 / Е.В. Агеев, С.В. Хардигов, В.А. Денисов, А.Ю. Алтухов // Электротехнология. – 2017. – №2. – С. 37-40.

110. Алтухов А.Ю. Исследование пористости спеченного образца электроэрозионной шарикоподшипниковой стали / А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеев, С.В. Хардигов // Прогрессивные технологии и процессы: сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – С. 214–218.

111. Хардигов С.В. Исследование микротвердости спеченного образца шарикоподшипниковой электроэрозионной стали / С.В. Хардигов, Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, Е.В. Агеев, А.А. Горохов // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. – 2016. – №2. – С. 25–30.

112. Агеева Е.В. Состав и свойства порошков, полученных электроэрозионным диспергированием хромсодержащих отходов [Текст]: монография / Е.В. Агеева, С.В. Хардигов, А.В. Щербаков, Е.В. Агеев. Курск: Университетская книга, 2016. – 152 с.

113. Ageev E.V. X-ray diffraction analysis of the chromium-containing electroerosion powders of micro - and nanoparticles / E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, V.V. Serebrovskii, S.V. Khardikov, A.V. Scherbakov, A.N. Novikov // Журнал нано- и электронной физики. – 2016. Т. 8. – №4. – С. 04048 (1–2).

114. Ageev E.V. Electron probe microanalysis of ball-bearing steel powder obtained using the method of electroerosion dispersion in kerosene / E.V. Ageev, S.V. Khardikov, S.V. Pikalov,

V.P. Tikhomirov // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015 2015. С. 7414945.

115. Пат. 2597443 Российская Федерация, МПК В22F9/14 (2006.01), С22С7/00 (2006.01), С22С38/00 (2006.01). Способ получения стальных порошков электроэрозионным диспергированием отходов шарикоподшипниковой стали в воде / Е.В. Агеева, С.В. Хардигов, Е.В. Агеев, А.С. Осьминина // заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т. – № 2015109483/02; заявл. 16.09.2014; опубл. 19.03.2015, Бюл. 25.

Приложение А – Акт внедрения в производство

ООО «Росутилизация 46»

ИНН/КПП 4632119664/463201001
ОГРН 1104632003464, ОКПО 63160526
305018, г. Курск, ул. Народная, 7 А.

 УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
Щербаков А.В.
_____ 2017 г.

АКТ

о внедрении научно-исследовательской работы

В рамках совместной научно-исследовательской работы ООО «Росутилизация 46» в лице генерального директора А.В. Щербакова и ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» в лице д.т.н., процессора Е.В. Агеева и аспиранта С.В. Хардикова в соответствии с патентом 2597443 2597443 Российская Федерация, МПК В22F9/14, С22С7/00, С22С38/00 (Способ получения стальных порошков электроэрозионным диспергированием от-ходов шарикоподшипниковой стали в воде) / Агеева Е.В., Хардиков С.В., Агеев Е.В., Осьминина А.С., заявитель и патентообладатель Юго-Зап. гос. ун-т. – № 2015109483/02; заявл. 16.09.2014; опубл. 19.03.2015, Бюл. 25) был разработан технологический процесс переработки отходов шарикоподшипниковой стали электроэрозионным диспергированием.

Разработанный технологический процесс переработки отходов шарикоподшипниковой стали отличается от известных промышленно применяемых безотходностью, малотоннажностью и отсутствием экологических проблем. Ожидаемый экономический эффект от внедрения ставит более 2 млн. руб. в год.


От ООО «Росутилизация 46»:
коммерческий директор

 Ахунов Р.И.

От ЮЗГУ:
Руководитель НОЦ «Порошковая металлургия
и функциональные
покрытия», д.т.н.

 Агеев Е.В.

Аспирант

 Хардиков С.В.

Приложение Б – Акт внедрения в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ
проректор по учебной работе
Юго-Западного государственного
университета д.т.н., профессор
О.Г. Локтионова
«6» февраля 2017 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Материалы научно-исследовательской работы аспиранта кафедры автомобилей, транспортных систем и процессов Хардикова С.В. «Разработка способа получения порошковых материалов путем электроэрозионного диспергирования шарикоподшипниковой стали» используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» при изучении дисциплины «Технология технического обслуживания и ремонта транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» (3 курс очной формы обучения направления подготовки бакалавров 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», профиль «Автомобильный сервис»).


Начальник
учебного отдела


Третьяк А.С.

Зав. кафедрой автомобилей,
транспортных систем и процессов
к.т.н., доцент


Алтухов А.Ю.

Аспирант кафедры автомобилей,
транспортных систем и процессов


Хардиков С.В.

4104 16.09.16

Приложение В – Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2597443

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ
ЭЛЕКТРОЭРРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ
ОТХОДОВ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ В ВОДЕ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2015109483

Приоритет изобретения 19 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 22 августа 2016 г.

Срок действия патента истекает 19 марта 2035 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

