

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

На правах рукописи
УДК _____

АШИРОВ АСРОР КОЮМОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИЗНОШЕННЫХ
ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФАРФОРОВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

ДИ С С Е Р Т А Ц И Я

**На соискание степени магистра
по специальности: 5А320305 – Машины и аппараты химических
производств и предприятий строительных материалов**

**Научный руководитель
к.т.н., доцент Рузибаев Б.Р**

Ташкент-2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

№	стр
ВВЕДЕНИЕ.....	2
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	
1.1 Анализ дефектов деталей.....	6
1.2 Анализ методов восстановления деталей.....	11
1.3 Материалы, используемые для электроискровой обработки деталей..	19
Выводы к главе 1.....	34
2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	
2.1 Оборудование, используемое при выполнении исследований.....	35
2.2 Методы исследования электроэрозионных порошков, используемых при восстановлении и упрочнении изношенных деталей.....	36
2.3 Методика исследования износостойкости поверхности и коэффициента трения покрытий.....	37
2.4 Методика исследования микроструктуры, микротвердости, прочности сцепления электроискровых покрытий.....	39
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ	
3.1 Исследования электроэрозионных порошков, используемых при восстановлении и упрочнении изношенных деталей.....	42
3.2 Исследования электроискровых покрытий.....	56
3.3 Исследования износостойкости поверхности покрытий.....	56
3.4 Исследования микроструктуры, микротвердости электроискровых покрытий.....	58
3.5 Исследования пористости электроискровых покрытий.....	59
3.6 Исследования прочности сцепления электроискровых покрытий.....	60
Выводы к главе 2.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	63
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	65

ВВЕДЕНИЕ

Отсутствие необходимой номенклатуры запасных частей на складах предприятий является одним из главных факторов снижения уровня технической готовности оборудования. Поэтому одним из основных источников экономической эффективности ремонта оборудования является восстановление изношенных деталей.

Восстановление изношенных деталей обеспечивает экономию металла, топлива, энергетических и трудовых ресурсов, а также рациональное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды. Для восстановления работоспособности изношенных деталей оборудования требуется в 5...8 раз меньше технологических операций по сравнению с изготовлением новых деталей.

Обеспечение необходимой номенклатуры запасных частей на складах предприятий требует масштабного развития ремонтной инфраструктуры и научно-обоснованных методов организации и управления процессами восстановления изношенных деталей. Решение этой важной научной и народнохозяйственной задачи приводит к объективной необходимости иметь научные основы организации эффективного ремонтного производства, что предопределило выбор темы, актуальность научного исследования с учетом его теоретической и практической значимости, формулировку цели, научной новизны и задач диссертационной работы.

Как показывает практика, порядка 85% деталей восстанавливаются при износе не более 0,3 мм, то есть их работоспособность восстанавливается при нанесении покрытия незначительной толщины. Для восстановления деталей с такими износами наиболее целесообразно использовать электроискровую обработку (ЭИО). ЭИО отличается технологической гибкостью, дешевизной и позволяет получать покрытия с широким диапазоном свойств.

Однако, во многих случаях свойства электроискровых покрытий изношенных деталей зависят от состава, структуры и свойств электродного материала. С практической точки зрения, наибольший интерес представляют электроды с наноразмерными частицами. Выполненный анализ опубликованных научных работ показал, что наиболее перспективным методом получения наноразмерных материалов является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД).

Актуальность темы. Изложенное выше подтверждает, что тема диссертационного исследования является актуальной и направлена на решение научно-практической задачи, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Совершенствование на основе научных исследований технологии восстановления и поверхностного упрочнения изношенных деталей путем применения электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов, обеспечивающих заданный ресурс.

Объекты исследований. детали оборудования фарфоровой промышленности, подлежащие восстановлению.

Научная новизна работы состоит:

- в научном обосновании применения эффективной технологии для восстановления изношенных деталей путем применения новых электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов;
- в установлении зависимости влияния свойств электроэрозионных материалов на свойства электроискровых покрытий восстановленных деталей, позволяющей добиться необходимого качества поверхности;
- в установлении зависимости влияния свойств электроискровых покрытий на ресурс восстановленных деталей, позволяющей добиться требуемого срока службы.

Практическая ценность. Восстановления и упрочнения изношенных деталей электроискровой обработкой электроэрозионными наноматериалами, обеспечивающими этим деталям

высокие эксплуатационные свойства, в том числе высокую износостойкость в условиях абразивного изнашивания. Разработанная технология отличается технологической гибкостью, дешевизной, простотой, не требует использования дорогих и дефицитных материалов и оборудования, а также отвечает требованиям экологической безопасности. Предлагаемая технология может быть использована для восстановления широкой номенклатуры деталей других машин и оборудования.

Апробация результатов. Основные положения магистерской диссертации доложены и обсуждены на научной конференции ТХТИ 2016-2017г.

Публикации. По диссертационной теме опубликовано 3 статьи.

Объём магистерской диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов, списка использованной литературы из наименований. Работа изложена на страницах компьютерного текста, включая таблиц и рисунков.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ дефектов деталей

Оборудования представляет собой сложную техническую систему, элементы которой имеют различные характеристики устойчивости к потере работоспособного состояния. На них влияют как внутренние конструктивные факторы, зависящие от назначения и свойств элемента, так и совокупность внешних факторов, определяемых как условия эксплуатации оборудования [1].

Литературный обзор показал, что для более 70% изношенных деталей рационально было бы повторное использование после восстановления. Это значительно снижает ресурсные затраты предприятий, а, кроме того, это экономически оправдано для ремонтного производства. Затраты на восстановление деталей в большинстве случаев не превышают 25–30% их стоимости, а при квалифицированном назначении технологии восстановления достигается 100%-ый ресурс. Разный срок службы деталей обусловлен различными причинами. Основными из них являются: выполняемые функциональные назначения, разнообразный диапазон нагрузок, различные виды трения в сопряженных деталях и разные материалы, из которых они изготовлены, точность и качество обработки в сопрягаемых деталях.

Детали типа «вал» составляют большую часть номенклатуры восстанавливаемых деталей. В большинстве случаев именно эти детали лимитируют ресурс узлов и агрегатов машин. Коэффициент их восстановления при капитальном ремонте машин составляет 0,25...0,95.

Длина восстанавливаемых валов составляет 100...4000 мм, однако более 90 % этих деталей имеют длину не более 1000 мм. Диаметры валов равны 12...210 мм, но у 98 % валов диаметр не превышает 60 мм. Среднее значение массы составляет около 3 кг.

У деталей типа «вал» наиболее часто дефекты появляются на посадочных поверхностях под подшипники и резьбовых поверхностях. Поверхности под подшипники восстанавливают при износе более 0,017...0,060 мм; поверхности неподвижных соединений (места под ступицы со шпоночными пазами и др.) за счет дополнительных деталей – при износе более 0,04...0,13 мм; поверхности подвижных соединений – при износе более 0,4...1,3 мм; под уплотнения – более 0,15...0,20 мм. Шпоночные пазы восстанавливают при износе по ширине более 0,065...0,095 мм; шлицевые поверхности – при износе более 0,2...0,5 мм [2]. Из всей совокупности восстанавливаемых поверхностей валов 46 % изнашиваются до 0,3 мм; 27 % – от 0,3 до 0,6 мм; 19 % – от 0,6 до 1,2 мм и 8 % – более 1,2 мм. Основным требованием, которое необходимо выполнить при восстановлении валов, является обеспечение размеров и шероховатости восстанавливаемых поверхностей, их твердости, сплошности покрытия, прочности сцепления нанесенных слоев с основным металлом, а также симметричности, соосности, радиального и торцевого биений обработанных поверхностей, параллельности боковых поверхностей зубьев шлицевых и шпоночных пазов оси вала.

Валы изготавливают преимущественно из среднеуглеродистой и низколегированной сталей. Их подвергают поверхностной закалке токами высокой частоты, цементации с последующей закалкой, нормализации.

Проведя анализ литературных источников [3,4] дефекты деталей типа «вал» принято делить на три группы: механические повреждения, химико-тепловые повреждения и износы деталей типа «вал».

Повреждения деталей типа «вал» механическим способом происходит в результате повреждения его поверхности трещинами, рисками и задирами, а так же возможен изгиб вала, его поломка или скручивание.

В ряде случаев на рабочих поверхностях деталей типа «вал» образуются риски и надиры, особенно часто это происходит в сопряжениях вал – подшипник скольжения, вследствие загрязнения смазки или

абразивного действия частиц чужеродного происхождения. На поверхности деталей типа «вал» могут образовываться трещины микронных размеров, вследствие воздействия избыточных местных нагрузок, ударов от воспламенения рабочей смеси или иного рода, а также перегруженности вала. Появление данного дефекта возникает в наиболее нагруженных местах деталей типа «вал» – на границе опорной поверхности. Больше всего трещинам подвержены валы, изготовленные из чугуна. Кроме трещин, возникающих в результате воздействия сил ударного характера, появляются усталостные трещины в наиболее напряженных местах деталей типа «вал» в результате продолжительного воздействия знакопеременных нагрузок. В ряде случаев трещины могут появляться в результате теплового воздействия. Так же, в основном для валов малого диаметра (до 1 мм), характерен изгиб и нарушение формы деталей в результате ударных нагрузок. В результате усталости металла при сильных ударах о вал наблюдаются его поломки и обломы, которые часто возникают на литых деталях. В ряде случаев от воздействия большого крутящего момента, связанного с преодолением временных значительных сопротивлений при работе, детали типа «вал» подвержены скручиванию [5].

Дефекты химико-теплового характера деталей типа «вал» возникают в результате сложных взаимодействий при тяжелых условиях работы узлов и агрегатов, в которых они установлены. К таким повреждениям относятся: коробление, коррозия, раковины и т.д. Данные повреждения встречаются реже, по сравнению с другими. Коробление деталей происходит в результате воздействия высоких температур, приводящих к возникновению структурных изменений и больших внутренних напряжений. В редких случаях происходит коррозионный процесс, то есть разрушение металла, из которого изготовлен вал, вследствие химического или электрохимического взаимодействия его с коррозионной средой. Поскольку подавляющее большинство технологических сред представляет

собой электролиты, то основным видом коррозии оборудования является электрохимическая коррозия.

У деталей, в том числе типа «вал», встречается коррозия сплошная (равномерная и неравномерная) либо местная. Коррозия со сплошной площадью покрытия заключается в постепенном уменьшении первоначальной толщины поверхности детали, при этом возможен расчет ее скорости заранее, используя данные по коррозионной стойкости конструкционных материалов в конкретных технологических средах. Но большее вредное воздействие представляет местная (избирательная) коррозия. Основными причинами появления местной коррозии, т. е. коррозии, охватывающей отдельные участки поверхности деталей, являются как внутренние факторы (непостоянство структуры и свойств материала, состояние поверхности, неоднородное напряженное состояние в элементах конструкции и т.п.), так и внешние факторы, определяемые, прежде всего, условиями взаимодействия металла со средой (температура, давление, время, условия контактирования, состав коррозионной среды и т. п.).

Разнообразие условий эксплуатации обуславливает различные виды изнашивания рабочих поверхностей деталей, в том числе деталей типа «вал». Для валов характерными видами изнашивания являются абразивное, коррозионно-механическое, гидроабразивное, гидроэрозионное и кавитационное.

Наиболее распространенным видом дефектов является коррозионно-механическое изнашивание, происходящее в результате механических воздействий, сопровождающихся химическим или электрохимическим воздействием среды на металл. В результате совместного воздействия механического и коррозионного факторов в поверхностных слоях металла происходят взаимосвязанные явления, способствующие активации процессов упругопластического деформирования, химических и электрохимических реакций и т. д.

К наиболее распространенному виду коррозионно-механического изнашивания относят, прежде всего, разрушение металлов за счет трения сопрягаемых поверхностей при недостаточной смазке или ее отсутствии, которое сопровождается одновременным воздействием на поверхность металла коррозионной среды и сил трения. Особенно интенсивно этот процесс протекает при работе шкворней, на поверхности валов, цапф и защитных втулок насосов, и других деталей.

Возможно гидроабразивное изнашивание, происходящее в результате воздействия на поверхность металла твердых абразивных частиц, взвешенных в жидкости и перемещающихся относительно изнашиваемой поверхности. Такой вид характерен для рабочих колес и корпусов насосов, предназначенных для перекачки технологических жидких сред. В некоторых случаях возможным дефектом является изнашивание при заедании, то есть изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на соединенные поверхности. При трении сопрягаемых поверхностей адгезионная связь вносит вклад в силовое взаимодействие. Разрыв фрикционной связи происходит по плоскостям максимальных касательных напряжений и локализуется для шероховатых поверхностей в теле микронеровностей. Изнашивание при схватывании проявляется при отсутствии смазочных пленок и поверхностных структур, локализуя линии пластического течения в тонких поверхностных слоях.

В этих случаях плоскости максимальных напряжений распространяются в более глубокие от поверхности контакта слои и существенно увеличивают объем деформируемого материала. Разрушение материала происходит на значительной от поверхности глубине, а часть отделившегося материала налипает на поверхность соединенной детали. Если усилие сдвига превышает уровень движущихся сил, относительное движение деталей прекращается и происходит задир соединенной пары.

Такой вид изнашивания является катастрофическим, приводящим к быстрому выходу из строя узла трения. Анализ причин неисправности деталей типа «вал» показал, что большей частью (более 70 %) основных дефектов является изнашивание деталей, которые работают в сопряжениях типа вал – подшипник [5].

1.2. Анализ методов восстановления деталей типа «вал»

Валы оборудований и других агрегатов являются весьма разнообразными в конструктивно-технологическом отношении и этим определяется различие способов их восстановления, несмотря на то, что основными дефектами всех валов являются износы подшипниковых шеек. Из других дефектов, исходя из конструкции, наблюдаются: износы кулачков, зубьев шестерен, резьбовых и шлицевых поверхностей; забитость центровых отверстий и др.

Выбором рациональных методов восстановления деталей начали заниматься с появлением промышленных видов ремонта. Преимущественное применение при восстановлении валов получили следующие виды наплавки: в среде углекислого газа, вибродуговая в различных защитных средах, в природном газе и под флюсом. Эти процессы применяют преимущественно при износах более 0,5 мм. Для восстановления поверхностей, работающих в условиях неподвижных сопряжений, широко распространена электроконтактная приварка металлического слоя (ленты, проволоки). Преимущества электроконтактной приварки: незначительный нагрев деталей, возможность приварки металлического слоя различной твердости и износостойкости, уменьшение расхода наплавочных материалов, возможность регулирования толщины наносимого слоя в зависимости от износа, значительное повышение производительности и улучшение условий труда специалистов.

По сравнению с другими способами восстановления деталей наплавка позволяет получать покрытие на поверхности деталей необходимой толщины и заданного химического состава, высокой твердости и износостойкости. В

общем объеме работ по восстановлению деталей на ремонтных предприятиях различные способы восстановления составляют: наплавка под слоем флюса 32%, вибродуговая наплавка 12%, наплавка в среде углекислого газа 20%, наплавка порошковой проволокой без флюсовой или газовой защиты 10%, плазменная наплавка 1,5%, электроконтактноенапекание 6%, гальванические способы 5%, электромеханическая обработка 1%, электрошлаковая наплавка 1,5%, заливка деталей жидким металлом 2% и восстановление деталей полимерами 5% [2].

При наплавке под слоем флюса, в зону горения дуги (рисунок 1.2), подают сыпучий флюс, который состоит из отдельных мелких зерен (крупниц). Из-за воздействия высокой температуры часть флюса плавится и вокруг дуги, образуя эластичную оболочку, которая защищает расплавленный металл от действия азота и кислорода. После того, как дуга переместится, жидкий металл твердеет вместе с флюсом, образуя ломкую шлаковую корку на наплавленной поверхности. Тот флюс, который не расплавился, снова может использоваться. Наплавку под слоем флюса используют для восстановления различных деталей, тракторов и сельскохозяйственных машин.

В тех случаях, когда необходимо наплавить слой толщиной более 3 мм (при выполнении наплавки на деталях ходовой части тракторов и сельскохозяйственных машин – катках, цапфах, роликах, осях и т. д.), эффективна автоматическая наплавка. Глубокое проплавление нежелательно, так как оно увеличивает деформацию детали.

Влияние на глубину проплавления оказывает относительное размещение электрода и детали. В практике применяют наплавку углом вперед, при которой глубина проплавления меньше, чем при наплавлении углом назад. Глубина проплавления также уменьшается с увеличением вылета электрода.

Проволоку из низкоуглеродистых (Св-08, Св-08А), марганцовистых (Св-08Г, Св-08ГА) и кремнемарганцовистых (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС)

сталей используют для наплавки низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Наплавляют проволокой Нп-65Г, Нп-80, Нп-30ХГСА, Нп-40Х13 (ГОСТ 10543—82) стали с большим содержанием углерода. Флюсы подразделяют на флюсы-смеси, керамические и плавленные.

Плавленные флюсы АН-348А, АН-60, ОСУ-45, АН-20, АН-28 содержат стабилизирующие и шлакообразующие элементы, но в состав этих флюсов не входят легирующие добавки, что не способствует повышению прочности и износостойкости наплавленного металла.

Керамические флюсы АНК-18, АНК-19, ЖСН-1, кроме стабилизирующих и шлакообразующих элементов, содержат легирующие добавки – ферросплавы, которые при наплавке малоуглеродистой проволокой обеспечивают высокую твердость и износостойкость наплавленного металла [2].

Флюсы-смеси состоят из флюса АН-348А с добавлением феррохрома, ферромарганца и графита. Смесь расстилают слоем 15...20 мм на листе, сушат 15...25 мин при температуре 100...120°С, а затем просеивают через сито № 16 и высушивают при температуре 150...200 °С в течение 3...4 ч.

Смешивая агломерат с флюсом в необходимом соотношении, получают легирующий флюс, применение которого позволяет получать наплавленный слой однородного химического состава, высокой твердости и износостойкости.

Такие дефекты, как неравномерность ширины и высоты наплавленного валика в связи с износом мундштука или подающих роликов; чрезмерный вылет электрода; наплыв металла в результате чрезмерной силы сварочного тока либо недостаточного смещения электродов из зенита; образование пор в наплавленном металле, в связи с повышенной влажностью флюса (его нужно просушить в течение 1...1,5 ч при температуре

250...300°С), неустойчивая дуга как результат ненадежного контакта, могут возникнуть при наплавке [4].

Хорошие результаты при наплавке дает использование порошковой проволоки, в состав которой входят феррохром, ферротитан, ферромарганец, графитовый и железный порошки. Наплавку выполняют под слоем флюса или в среде защитного газа, но при введении в проволоку соответствующих компонентов возможна наплавка и без флюсовой или газовой защиты.

Порошковую проволоку изготавливают на специальных станках методом волочения. Исходным материалом служит лента из низкоуглеродистой стали и порошок, содержащий необходимые элементы. Используют два типа порошковой проволоки: для наплавки под флюсом и для наплавки открытой дугой. В определенной степени, способ наплавки в среде углекислого газа, отличается от других способов восстановления деталей – не нужно ни электродных покрытий, ни флюсов. Дуга, которая находится между электродом и наплавляемым изделием горит в струе газа, вытесняющего воздух из плавильного пространства и защищающего расплавленный металл от воздействия кислорода и азота.

Следующие преимущества имеет автоматическая наплавка в среде углекислого газа: при наплавке нет вредных выделений и шлаковой корки; открытая дуга дает возможность наблюдать и корректировать процесс, выполнять наплавку при любом пространственном положении наплавляемой плоскости, механизировать наплавку, применяемую на мелких деталях (валах диаметром 10 мм и более).

Следующее оборудование, используют для наплавки: наплавочные головки АБС, А-384, А-409, А-580, ОКС-1252М; источники питания ВС-200, ВСУ-300, ВС-400, ПСГ-350, АЗД-7,5/30; подогреватели газа; осушитель, который заполнен силикагелем КСМ крупностью 2,8...7 мм; редукторы-расходомеры ДРЗ-1-5-7, либо ротаметры РС-3, РС-3А, Р КС-65, либо кислородный редуктор РК-53Б.

Через сопло по рукаву из баллона углекислый газ, внутри которого находится наконечник, подается между концом электродной проволоки и наплавляемым изделием к дуге, затем окружает дугу со всех сторон и вытесняет воздух из плавильного пространства. В среде углекислого газа наплавку исполняют на постоянном токе обратной полярности. Тип, а также марка электрода зависят от материала восстанавливаемой детали и требуемых физико-механических свойств наплавленного металла. От силы тока зависит скорость подачи проволоки, которая устанавливается с таким расчетом, чтобы в процессе наплавки не происходило коротких замыканий, а также обрывов дуги. Скорость наплавки устанавливается в зависимости от толщины наплавляемого металла, а также качества формирования наплавленного слоя. С шагом 2,5...3,5 мм производят наплавку валков. От марки и типа электродной проволоки 200...300 НВ зависит твердость наплавленного металла, а расход углекислого газа – от диаметра электродной проволоки. Так же скорость наплавки, конфигурация изделия и наличие движения воздуха оказывают влияние на расход углекислого газа [5-7].

Жесткую внешнюю характеристику и скорость нарастания силы тока короткого замыкания 70...110 кА/с должны иметь источники питания дуги. Разновидностью дуговой наплавки является вибродуговая наплавка металлическим электродом. Процесс наплавки осуществляется при вибрации электрода с подачей охлаждающей жидкости на наплавленную поверхность. На суппорте токарного станка закрепляют наплавочную головку (ОКС-6569 или ОКС-1252). Для питания дуги используют источники постоянного тока. Для уменьшения нагрева детали и улучшения закалки привариваемого слоя в зону сварки подают охлаждающую жидкость. Способ восстановления деталей контактным электроимпульсным покрытием часто используют для восстановления посадочных мест под подшипники в корпусных деталях и валах, а также резьбовых частей валов. Приварка к изношенным поверхностям порошковых твердых сплавов является перспективной для

упрочнения и восстановления деталей. При контактной сварке металл прогревается на малую глубину, что обеспечивает неизменность его химического состава и отпадает необходимость в применении флюсов и защитных газов.

При износе неподвижных поверхностей до 0,2 мм эффективно электромеханическое высаживание и выглаживание. Восстановление деталей этим способом не требует дополнительного материала, а при выглаживании поверхности происходит упрочнение поверхностного слоя, повышается износостойкость и усталостная прочность [8].

Гальванические процессы применяются только при массовом восстановлении однотипных деталей [9]. Восстановление гладких валов и осей рекомендуется по трем технологическим маршрутам. Схема технологического процесса восстановления включает маршруты различного вида, например, по одному маршруту восстанавливают наплавкой с последующей механической и термической (при необходимости) обработкой детали со значительным износом; по другому маршруту – детали, для которых целесообразно применение электроконтактной приварки ленты или проволоки; по отдельному маршруту – детали, для которых технически возможно применение электромеханической обработки. При этом поверхности деталей со значительным износом (резьбы, шпоночные пазы) при восстановлении их по второму и третьему маршрутам восстанавливают наплавкой.

На шлицевых валах наряду с устранением дефектов, характерных для валов, необходимо восстанавливать шлицевые поверхности. Наиболее широко для восстановления шлицевых поверхностей применяют дуговую наплавку. Технологический процесс включает в себя операции наплавки, нормализации, токарной обработки, фрезерования, термической обработки и шлифования. Технология трудоемка и не всегда экономически выгодна. Шлицевые поверхности могут быть восстановлены электроконтактной приваркой металлических полос, но существенного снижения трудоемкости

и повышения качества восстановления при этой технологии не достигается. При небольших износах для восстановления шлицевых валов рекомендуется холодное пластическое деформирование. При износе зубьев по толщине до 0,5 мм на их нерабочей наружной поверхности холодным пластическим деформированием на гидравлическом прессе с помощью шлиценакатной головки формируют технологическую канавку. Металл, вытесненный из канавки, заполняет боковую изношенную поверхность зуба и увеличивает наружный диаметр вала, обеспечивая минимально необходимый припуск для механической обработки шлицевой поверхности.

Если износ зубьев по толщине составляет 0,5...1,2 мм, тогда на их наружной поверхности наплавляют валики металла и осаживают на гидравлическом прессе с помощью шлиценакатной головки. При осадке наплавленные на зубья валики внедряются в основной металл, увеличивая ширину зубьев до необходимых размеров в целях получения припуска на механическую обработку.

При износе зубьев по толщине более 1,2 мм наплавляют их боковые и наружные поверхности и подвергают механической обработке без деформирования.

При технологии массового восстановления гладких и шлицевых валов в организационном плане применяется углубленный принцип групповой технологии восстановления, создание унифицированной групповой оснастки для восстанавливаемых поверхностей деталей. По технологии необходимо переходить на высокопроизводительные газотермические способы нанесения порошковых материалов повышенной износостойкости для наружных цилиндрических поверхностей подвижных и неподвижных сопряжений.

Известно, что прочностные свойства деталей зависят от физико-механических характеристик материала, из которого они изготовлены. Но ресурс деталей и инструментов при достаточной прочности основного материала обычно связан с качеством рабочей поверхности и

эксплуатационными свойствами их поверхностного слоя. Он может быть существенно повышен путём изменения рельефа поверхности, состава, структуры и свойств поверхностного слоя. Для создания поверхностных слоёв с требуемыми характеристиками (состав, структура, толщина и др.) применяют различные методы обработки – механические, термические, электрофизические, электрохимические и их сочетание. В результате формируются поверхностные слои толщиной от нескольких микрометров до 1 мм с более улучшенными характеристиками, противостоящие истиранию, повышенной температуре, коррозии, эрозии и другим факторам, инициирующим изнашивание рабочих поверхностей деталей [7].

Широкое применение на практике для упрочнения и восстановления металлических поверхностей нашли методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии с удельной мощностью в пятне нагрева более 102 Вт/мм.

Упрочнение методами электроискровой обработки применяют для повышения: износостойкости и твердости поверхности деталей машин, работающих в условиях повышенных температур в инертных газах, жаростойкости и коррозионной стойкости поверхности, долговечности металлорежущего, деревообрабатывающего, слесарного и другого инструмента, а так же для создания шероховатости под последующее гальваническое покрытие, облегчения пайки обычным припоем труднопаяемых материалов (нанесение промежуточного слоя, например меди), увеличения размеров изношенных деталей машин при ремонте, изменения свойств поверхностей изделий из цветных металлов и инструментальных сталей [10].

Электроискровая обработка заключается в легировании поверхностного слоя металла изделия, являющегося катодом, материалом электрода (анода) при искровом разряде в воздушной среде.

В результате химических реакций легирующего металла с диссоциированным атомарным азотом и углеродом воздуха, а также с материалом детали, в поверхностных слоях образуются закалочные структуры и сложные химические соединения (высокодисперсные нитриды, карбонитриды и карбиды), возникает диффузионный износостойкий упрочненный слой.

Упрочненный слой имеет высокую твердость и износостойкость. Твердость слоя, измеренная методом Виккерса на приборе ПМТ-3, составляет 1000...1400 HV и зависит от материала электрода. Общий слой электроискрового упрочнения состоит из верхнего белого нетравящегося слоя и нижнего переходного диффузионного слоя с переменной концентрацией легирующих примесей и карбида, с сильно измененной исходной структурой, постепенно переходящей в структуру основного металла. В большинстве случаев нижний слой по глубине несколько больше верхнего. В связи с наличием диффузионного слоя в структуре упрочненного металла возможно многослойное упрочнение, в том числе с образованием разнолегированных слоев. Последующее воздействие лазерного излучения улучшает свойства упрочненной поверхности, легированной электроискровым методом, и снижает степень ее шероховатости.

Одним из перспективных методов восстановления цилиндрических поверхностей деталей, в том числе деталей типа «вал» является метод электроискровой обработки, из-за малой глубины проплавления (30...100 мкм), большой концентрации энергии в пятне нагрева и высокой износостойкости покрытий.

1.3. Материалы, используемые для электроискровой обработки деталей

В качестве наплавочных электродных материалов для электроискровой обработки могут быть использованы следующие материалы, [10].

К первой группе материалов относятся карбидные, нитридные, боридные и керметные соединения тугоплавких металлов, имеющие малое количество металлической связки. Туда же относится достаточно большой круг металлокерамических твердых сплавов: вольфрамокобальтовых (типа ВК), титановольфрамокобальтовых (типа ТК), титанотанталовольфрамокобальтовых (типа ТТК), состав которых регламентирован ГОСТ 3882-74, а конструкция и размеры определены ГОСТ 25416-90 и ГОСТ 25425-90. К этой группе относится и ряд марок безвольфрамовых твердых сплавов типа ТН-20, КНТ-16, И-3, близких по своим характеристикам сплавам группы ТК.

Хороший слой покрытия образуют материалы, относящиеся к первой группе. В результате их достаточно малой химической активности они меньше всего чувствительны к составу окружающей среды, а также к материалу изделия. Данные покрытия имеют минимальную склонность к схватыванию при трении (в особенности, если данные материалы не имеют металлической связки) и придают поверхностям высокую твердость и износостойкость. Тем не менее, их относительно высокий коэффициент трения (0,3 ... 0,7) не всегда может позволить использовать данные покрытия для деталей трения без дополнительной обработки, которая снижает коэффициент трения [11].

Согласно молекулярно-механической теории трения, для обеспечения низкого трения и малого износа необходимо, чтобы прочность возникающих молекулярных связей поверхностей трения была меньше прочности нижележащих слоев. В паре трения такое требование может быть реализовано нанесением мягких металлических покрытий и смазок. Во вторую группу электродных материалов входят мягкие металлы и их сплавы, а именно: алюминий, медь, серебро, золото, свинец, олово и др.

Важность метода ЭИО относительно других способов нанесения покрытий вышеперечисленными материалами заключается в высокой

прочности сцепления покрытия с основой, а также возможности нанесения данных материалов в заключительной стадии обработки изделия.

При нанесении данных материалов на обрабатываемую поверхность образуется мягкий антифрикционный и антикоррозионный слой, снижающий коэффициент трения пар скольжения, повышающий надежность работы сопряжений. Покрытия из данных материалов имеют высокую электропроводность, а легирование алюминием повышает твердость, а так же жаростойкость поверхностей изделия. К третьей группе электродных материалов относятся остальные металлы, а именно: вольфрам, титан, молибден, хром, железо, кобальт, никель и т.д., а так же сплавы на их основе, включая ферросплавы. В данной группе наблюдается достаточно большое различие в способности металлов осаждаться на изделии при электроискровых разрядах, которое обусловлено как свойствами самих материалов, так и их чувствительностью к химическому составу материала изделия, которое обрабатывается. Также различаются и эксплуатационные характеристики формируемых покрытий, так вольфрам отлично наносится на токопроводящий материал в достаточно большом диапазоне электрических режимов, но в итоге, покрытие получается неравномерным по толщине и электрод обычно «залипает». Покрытие, как правило, имеет высокую износостойкость и теплостойкость. При титановом покрытии процесс ЭИО проходит устойчиво, формируется ровный, но относительно тонкий слой износостойкого и коррозионностойкого покрытия. Молибденовое покрытие имеет равномерный слой на хромистых и малолегированных сталях. Равномерный, но тонкий, в основном, диффузный слой образуется на высоколегированных никелевых сплавах. Лучшие покрытия этим металлом получаются при использовании режимов со средней или малой энергией импульсов. Покрытия имеют высокую износостойкость и коррозионную стойкость. Хромовые покрытия выполняются при обработке разнообразных по составу материалов изделий и формируют хорошее по

количеству перенесенного металла, сплошное, а так же равномерное покрытие, которое обладает высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью и жаростойкостью. Для никелевых покрытий процесс ЭИО происходит с «залипанием» электрода к изделию, а так же покрытие неравномерно по толщине, но ему присущи повышенные жаростойкость и коррозионная стойкость. Электроды из ферросплавов позволяют наносить покрытия со свойствами, близкими свойствам покрытий из монометалла, являющегося исходным по отношению к ферросплаву, при этом толщина покрытия ферросплавом, как правило, больше толщины покрытия из монометалла.

Стали, вследствие их большого многообразия по химическому составу, применяются в качестве электродов преимущественно при восстановлении размеров деталей машин, обеспечивая получение необходимых эксплуатационных характеристик.

В каждом определенном случае материалы для нанесения покрытий отбираются исходя из условия наименьшей устойчивости против эрозии. По эрозионной стойкости (в первом приближении) чистые металлы располагаются в следующей последовательности: Zn, Ni, Ti, Zr, Al, Hf, Co, V, Fe, Cr, Nb, Cu, Ag, Ta, Mo, W [12].

Исследования в области наноматериалов и нанотехнологий определяют на ближайшее время развитие науки и промышленности. Резко возросший интерес к ультрадисперсным наноматериалам и технологиям вызван их огромным значением для фундаментальной науки, а также перспективным прикладным значением для многих отраслей промышленности [13].

В научной литературе присутствует достаточно много упоминаний о положительном влиянии наноразмерных частиц на свойства материалов, включая порошковые [14].

Наиболее перспективным методом получения порошковых металлов в том числе нанодисперсных, практически из любого токопроводящего материала, является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) [15].

Данный метод имеет весьма значимые достоинства, такие, как: относительно невысокие затраты на электроэнергию, безвредность и экологическая чистота процесса, отсутствием механического износа оборудования, получением порошка непосредственно из кусков вольфрамсодержащих отходов (быстрорежущей стали) различной формы за одну операцию, получением частиц преимущественно сферической формы [16].

Явление эрозии металлов под воздействием электрического тока впервые описали в конце XVIII века английским ученым Джоном Пристли. Было замечено, что при разрыве электрической цепи в месте разрыва возникает искра или длительная электрическая дуга. При этом, что дуга или искра оказывает сильнейшее разрушительное действие на контакты разрываемой цепи, которое называется электрической эрозией. Электрической эрозии подвержены контакты реле, рубильников, выключателей и других типовых устройств. Разрушение контактов при воздействии электрической эрозии является достаточно вредным явлением. Множество исследований было направлено на устранение или хотя бы уменьшение такого разрушения контактов. Академик В.В. Петров наблюдал электрическое разрушение металла в его известных опытах с электрической дугой. В работах Фарадея также интерпретируется такое явление, как разрушения металла при электрическом разряде. В конце XIX и начале XX веков были изданы работы, которые были специально посвящены электрическому разрушению металлов. Работа Бенедикса, в которой приводятся фотографии лунок в железе, заслуживает особого внимания. [17,18].

Независимо от них В.Н. Гусев[19] также занимался электроэрозионным методом обработки металлов, получивших широкое распространение и активно применяемых в наше время [20-23].

Поместив электроды в жидкий диэлектрик и размыкая электрическую цепь, Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко отметили, что жидкость мутнела уже

после первых разрядов между контактами. Они установили: это происходит потому, что в жидкости появляются мельчайшие металлические шарики, возникающие в результате электрической эрозии электродов. Ученые решили увеличить эффект разрушения и применили электрические разряды для равномерного удаления металла. Для этой цели они поместили электроды (инструмент и заготовку) в жидкий диэлектрик, охлаждающий расплавленные частицы металла и не позволяющий им оседать на противоположащий электрод. Батарея конденсаторов использовалась в качестве генератора импульсов, заряжаемых от источника постоянного тока; время зарядки конденсаторов регулировали реостатом. Так появилась первая в мире электроэрозионная установка. Электрод – инструмент перемещали к заготовке. По мере их сближения возрастала напряженность поля в межэлектродном промежутке (МЭП). При достижении конкретной напряженности поля на участке с минимальным расстоянием между поверхностями электродов, измеряемым по перпендикуляру к обрабатываемой поверхности и называемым минимальным межэлектродным зазором, возникал электрический разряд (протекал импульс) тока, под действием которого происходило разрушение участка заготовки. Продукты обработки попадали в диэлектрическую жидкость, где охлаждались, не достигая электрода – инструмента, и затем осаждались на дно ванны. Через некоторое время электрод – инструмент прошил пластину, причем контур отверстия точно соответствовал профилю инструмента.

Так, явление, считавшееся вредным, было применено для размерной обработки материалов. Изобретение электроэрозионной обработки (ЭЭО) имело выдающееся значение. К традиционным способам формообразования (резанию, литью, обработки давлением) прибавился совершенно новый, в котором непосредственно использовались электрические процессы.

Первые исследования по применению электрической эрозии металла для получения порошков относятся к 40-ым годам прошлого столетия.

Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко предложили использовать эффект электрической эрозии для получения высокодисперсных порошков [18].

Несмотря на достаточно высокую производительность порошкообразования, дисперсность порошка, возможности регулирования гранулометрического состава и степени охлаждения, а также относительно невысокие энергетические затраты и экологическую чистоту процесса, в отличие от других способов получения порошка из отходов твердых сплавов, способ получения металлического порошка методом электроэрозионного диспергирования не нашел широкого применения в промышленности. Это связано с недостаточной изученностью строения и свойств порошков, а также закономерностей процессов порошкообразования при электроэрозионном диспергировании отходов твердых сплавов[24].

Основные достоинства метода ЭЭД: – возможность получения особо чистых ультра- и нанодисперсныхметаллопорошков, полного исключения загрязнения в процессе диспергирования, включая оксидами, так как рабочим органом является искровой разряд, а инертная среда предотвращает его окисление; возможность пассивации порошков оксидной пленкой в процессе диспергирования путем введения в состав инертного газа контролируемого количества кислорода; – возможность диспергирования металлов и сплавов с критическими химическими и физическими свойствами (тугоплавкость, твердость, хрупкость, радиоактивность, химическая активность и т.д.); – возможность регулирования дисперсности порошков в широких пределах (3 нм...5 мкм) — размер образующихся частиц зависит от электрических параметров элементарных разрядов, конструкции реактора, среды диспергирования; – возможность получения порошков сферической формы с аморфной, стеклообразной и мелкокристаллической структурой частиц, с высокоразвитой поверхностью (уникальные магнитные свойства, высочайшая химическая активность и сорбционная способность); –

возможность (в случае изменения свойств рабочей среды) осуществления в процессе диспергирования химических реакций и получение порошковых оксидов, гидроксидов, нитридов, карбидов, шпинелей и т.д.; – возможность протекания высокотемпературных процессов под воздействием плазмы искровых разрядов при температуре рабочей среды, близкой к комнатной; – экологическая чистота – отсутствие стоков, газовых и пылевых выбросов (в методе ЭЭД реагенты, как правило, не используются):

- в отдельных случаях возможно выделение водорода);
- низкая удельная энергоемкость процесса (в 1,5...3 кВт для производства 1 кг порошка);
- компактность технологического оборудования (0,8...1 м на одну установку) и др. [25-34].

В случае, если оборудования находится в работоспособном состоянии и технически исправен, то он может участвовать в транспортном процессе, а также приносить определенный доход.

Совокупностью меняющихся свойств элементов определяется, техническое состояние агрегатов, механизмов, а также соединений, которые характеризуются текущим значением конструктивных параметров Y_i . Обычно текущие значения конструктивных параметров связывают с наработкой [35].

При повышении наработки l, t (рисунок 1.1) меняются параметры технического состояния от номинальных Y_n , которые свойственны новому изделию, до предельных Y_p , при которых последующая эксплуатация изделия по конструктивным, техническим, экологическим, экономическим либо другим причинам невозможна. ЗР- зона работоспособности; ЗО - зона отказов; ЗУ - зона упреждения отказов; $Y_{п.д}$ - предельно допустимое значение параметра; l_p - ресурс изделия; l_y - ресурс упреждения.

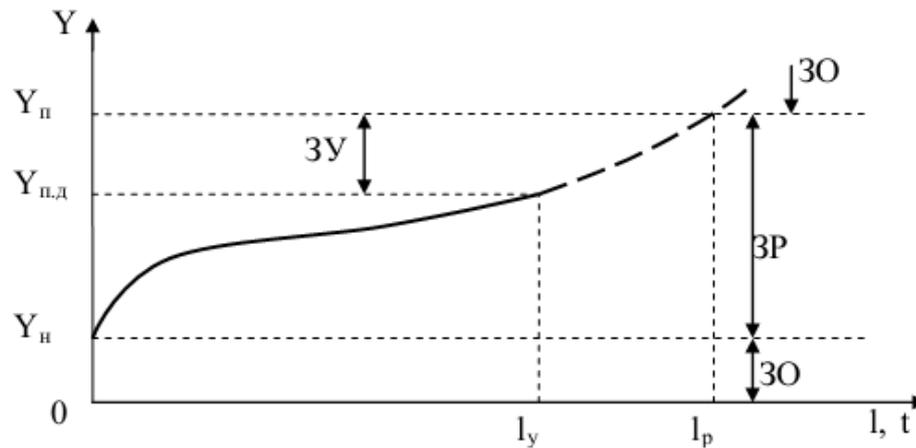
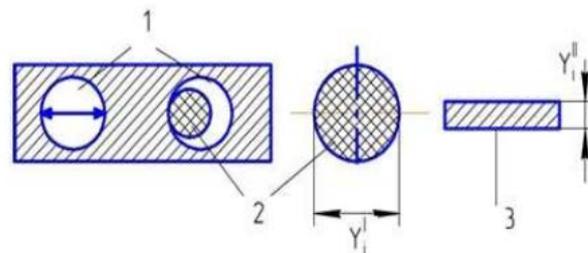


Рисунок 1.1 – Схема изменения параметров технического состояния.

На рисунке 1.1 приведены два характерных варианта изменения параметров технического состояния по наработке: I - увеличение; II - сокращение. Законами, государственными стандартами, постановлениями правительства, нормативно-техническими и проектно-конструкторскими документами утверждаются величины номинальных предельных, а также предельно допустимых $Y_{п.д}$ значений параметров технического состояния, которые систематизируются в справочных изданиях, в том числе и международных.



1 - втулка, 2 - вал, 3 - диск, Y_i I - увеличиваются, Y_i II - сокращаются в процессе работы оборудования

Рисунок 1.2 – Варианты изменения геометрических параметров деталей.

Основные причины изменения конструктивных параметров и технического состояния:

- нагружение элементов;
- взаимное перемещение элементов;
- воздействие тепловой и электрической энергии;

- воздействие химически активных компонентов;
- воздействие внешней среды (влаги, ветра, температура, солнечная радиация);
- воздействие оператора и др.

Последствием изменения формы конструктивных параметров во времени является изнашивание. Процесс изнашивания возникает под действием трения, зависящего от материала и качества обработки поверхностей, смазки, нагрузки, скорости относительного перемещения поверхностей и теплового режима работы сопряжения. Изнашивание - это процесс разрушения и отделения материала с поверхности детали и (или) накопления ее остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и формы деталей. Результат изнашивания, определяемый в установленных единицах, называется износом, который может быть линейным, объемным, массовым. Интенсивность изнашивания - это относительные величины износа к пути трения или показателю, связанному с работой изделия, километру пробега или часу работы γ , числу циклов и т.д. [36].

При преимущественно механическом разрушении поверхности, когда химические, тепловые и другие процессы не имеют решающего значения, интенсивность изнашивания определяется следующими группами обобщенных факторов:

$F_{см}$ - определяет относительную толщину смазочного слоя;

$F_{н}$ - характеризует напряженное состояние контакта, площадь фактического контакта сопряженных пар трения;

$F_{у}$ - характеризует усталостную прочность трущихся поверхностей;

$F_{Ш}$ - определяет влияние шероховатости на процесс изнашивания. Работоспособностью определяется состояние изделия, когда оно может выполнять определенные функции, с теми параметрами, которые соответствуют технической документации, а именно, в интервале $Y_n - Y_p$ (рисунок 1.1).

Наработка изделия до предельного состояния Y_p называется ресурсом - l_p . В интервале наработки от $l = l_0$ до $l = l_p$ изделие технически исправно и может выполнять свои функции [37].

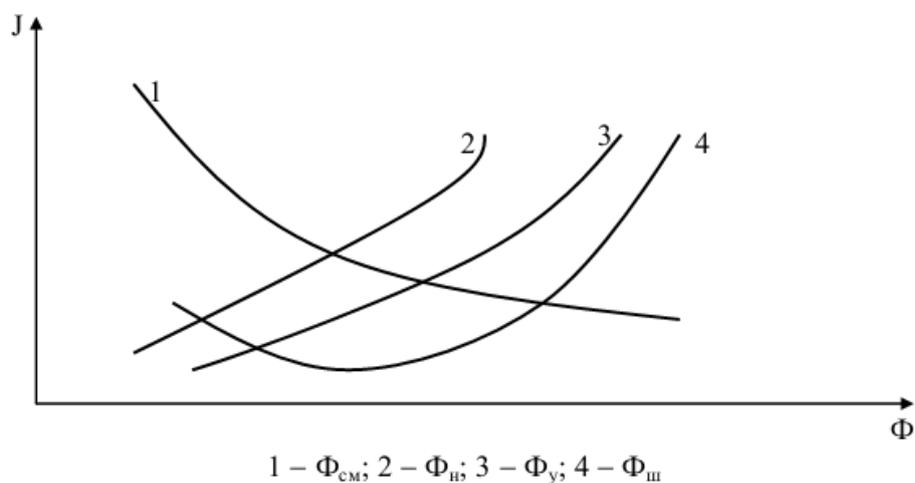


Рисунок 1.3 – Зависимость интенсивности изнашивания J от обобщенных безразмерных факторов.

Если продолжать эксплуатировать изделие за пределами его ресурса (рисунок 1.3), то при наработке $l > l_p$ наступает отказ, т.е. событие, заключающееся в нарушении или потере работоспособности.

Общая динамика изменения технического состояния определяется следующим образом:

$$Y_i = [Y_n \rightarrow Y_1 \rightarrow Y_2 \rightarrow \dots \rightarrow Y_{п.д} \rightarrow Y_p].$$

В отечественной и международной документации применяется также понятие «исправность», которое шире понятия «работоспособность» и соответствует такому состоянию изделия, при котором оно удовлетворяет всем требованиям документации [38].

При предупреждении отказов и неисправностей, в том числе для установления их источников, предъявления рекламационных претензий изготовителю или продавцу изделия недостаточно определить сам факт появления отказа или неисправности. Нужно понять причины, механизмы их появления и выражения, а также влияние различных отказов элементов на работоспособность оборудования в целом, т.е. на

способность выполнять работу. Иными словами, необходимо знать закономерности изменения технического состояния [39].

Применительно к техническому состоянию однотипных изделий причинами вариации являются:

- даже незначительные изменения от изделия к изделию качества материалов, обработки деталей, сборки;
- текущие изменения условий эксплуатации (скорость, нагрузка, температура и т. д.);

В итоге при закреплении для группы изделий заданного параметра технического состояния, например Y_p , каждое из изделий будет иметь свою наработку до отказа, а именно будет видна вариация наработки. Появляется вопрос: какую именно периодичность ТО нужно планировать для группы типовых оборудований [40].

Значение аналитических зависимостей состоит в том, что если известен вид закона (на основе опыта, литературных источников, наблюдений) и его параметры, то можно расчетными методами, не проводя объемных наблюдений, воспроизвести (прогнозировать) ожидаемые вероятности отказов и других состояний изделий и процессов. Например, для нормального закона необходимо знать два параметра (x), а для экспоненциального один (хили λ), чтобы рассчитать вероятность отказов и безотказной работы [41-42].

В саморегулирующихся механизмах происходит также с определенной периодичностью, но автоматически. Разница $Y_p - Y_{p.d}$ (предотказная зона) необходима, чтобы свести возможность (вероятность) отказа из-за неучтенных или неизвестных факторов (разные условия эксплуатации, качество материала, режимы эксплуатации) к минимуму. При этом величина $\Delta l = l_p - l_{to}$ определяет запас ресурса при принятой периодичности технического обслуживания l_{to} [43,44].

Таким образом, зная закономерности изменения технического состояния первого, второго и третьего видов, можно:

- количественно оценить вероятности нахождения оборудования в работоспособном состоянии;
- выбирать и эффективно использовать стратегии поддержания (I) или восстановления (II) работоспособности;
- обосновать и применить тактику обеспечения работоспособности по наработке и техническому состоянию и их комбинации [45].

Совместимость рассматривается как взаимодействие в процессе трения и износа поверхностей ТС, изготовленных из различных материалов при наличии смазочного материала, в режимах нарушения смазки и без смазочного материала. Изучению отдельных аспектов совместимости пар трения посвящены работы. Особенностью материалов, обладающих хорошей совместимостью, является способность их в ТС ускоренно снижать уровень контактных напряжений. Такое снижение легче осуществляется для мягкого металла и сплава, но снижение контактных напряжений возможно и для наиболее твердого элемента трибосистемы. Желательно, чтобы процесс деформирования отдельных наиболее нагруженных участков проходил в поверхностных слоях, без вовлечения в деформацию глубинных слоев, когда наиболее полно реализуется правило положительного градиента сдвигового сопротивления [46].

В процессе трения важно, чтобы система по возможности не выходила за границы устойчивого состояния, а периоды неустойчивого неравновесного состояния постоянно снижались и переходили в устойчивое состояние без непоправимых повреждений поверхностей трения. В.В. Шаповалов, О.Б. Богатин, Н.П. Старостин, варьируя частотно-амплитудными характеристиками нагружения, определили границы области устойчивых состояний ряда трибосистем на базе анализа термоупругой неустойчивости [47].

Следует различать совместимость ТС в процессе приработки и в послеприработочном периоде. Условно процесс приработки можно разбить на две фазы: 1) интенсивная приработка преимущественно на макроуровне,

когда в результате пластической деформации и износа увеличивается контурная и фактическая площадки контактирования; 2) при достижении достаточной площади контактирования возрастание площади единичных фактических контактов и увеличение их числа преимущественно на микроуровне [48].

После окончания процесса приработки независимо от величины и характера первоначальной шероховатости устанавливается равновесная шероховатость, закономерности образования которой и расчетные характеристики даны в трудах И.В. Крагельского и др. Одновременно, как показал Н.А. Буше, осуществляется самоорганизация ТС в результате структурной приспособляемости при трении [49].

Приработка ТС в интенсивном темпе при соблюдении режимов трения, приближающихся к критическим, происходит со снижением во времени показателей Зоммерфельда и коэффициента трения на известной зависимости Герси-Штрибека. При этом диапазон регулирования нагрузки и скорости не выходит за пределы полужидкостной смазки[50].

Особенности работы самосмазывающихся материалов предусматривают взаимодействие мягких фаз и твердой матрицы в процессе упругой и пластической деформаций. При использовании гетерогенных сплавов с мягкой фазой в процессе приработки наиболее интенсивно чем в после-приработочный период происходит выжимание этой фазы вследствие различия пределов текучести составляющих и разной степени пластической деформации при напряжениях выше предела текучести матрицы и мягкой фазы. Образующиеся за счет переноса металла из мягкой фазы тонкие защитные пленки способны создавать своеобразную разупрочняющую зону на сопряженных поверхностях.

Приработка ТС определяется степенью ее завершенности на каждом нагрузочно-скоростном режиме и после окончания. Полнота прохождения процесса приработки определяется нагрузочной способностью трибосистем, энергетическими показателями (КПД передач, снижением

расхода топлива, потерь на трение и др.), стабилизацией интенсивности изнашивания, фрикционной теплостойкостью и др. Назначение режимов приработки, в частности обкаточных режимов двигателей внутреннего сгорания, должно осуществляться с учетом критериев совместимости трибосистем [51].

Все изнашиваемые детали машин можно разбить на два класса: образующие пары трения и не образующие. Ко второму классу относятся детали рабочих органов машин: лемеха плугов, лапы культиваторов, режущие ножи, лопатки турбин и роторных насосов, звенья гусениц и т. д. Действием рабочей среды на деталь и отсутствием воздействия детали на физико-механические свойства контртела обусловлен процесс износа данных деталей.

В большой степени износостойкость пары в общем определяется взаимное влияние материала и текстуры поверхности одной детали на материал и текстуру поверхности другой детали, происходящее в парах трения.

Вместе с этим, износостойкость пары трения зависит от кинематики движения, а также соотношения площадей рабочих поверхностей.

Наблюдения износов деталей в процессе эксплуатации, стендовые данные, и данные, которые получены после лабораторных испытаний, дают возможность наметить определенные пути повышения их износостойкости и несущей способности.

В зонах фактического касания, для пар трения, удельная сдвиговая прочность молекулярных связей отображается биномиальной зависимостью [52].

Выводы к главе

1. Анализ дефектов в деталях типа «вал» показал, что 70 % основных дефектов это изнашивание деталей, которые работают в сопряжениях типа вал – подшипник.

2. Анализ методов восстановления показал, что в каждом рассмотренном методе имеются достоинства и недостатки, а так же одним из перспективных методов восстановления деталей типа «вал» является электроискровая обработка.

3. Проведен анализ материалов, используемых для электроискровой обработки деталей в качестве электродов для нанесения покрытий. Установлено, что содержание наноразмерных частиц в электродном материале приводит к улучшению физико-механических свойств восстановительных покрытий.

4. Проведен анализ возможности применения метода электроэрозионного диспергирования для получения частиц, содержащих наноразмерную фракцию.

2.Методология и методы исследования.

2.1. Оборудование, используемое при выполнении исследований

Исследование проведено путем формирования новых положений и научной аргументации предложений на основе многочисленных трудов отечественных и зарубежных ученых в области восстановления изношенных деталей. При решении поставленных задач использовались современные методы испытаний и исследований, в том числе:

гранулометрический состав определяли на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес»; рентгеноспектральный микроанализ порошкового материала электродов определяли с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX; исследования формы и морфологии микрочастиц определяли с помощью растрового электронного микроскопа фирмы «FEI» «Quanta 600 FEG»; рентгеноструктурный анализ порошкового материала электродов проводили на аналитическом рентгеновском дифрактометре «ARL9900 IntellipowerWorkstation»; удельную поверхность определяли по одно- и пятиточечному методу БЭТ на газо-адсорбционном анализаторе «TriStar II 3020»; твердость электродов определяли с помощью полуавтоматического микротвердомера «Instron 402 MVD» по шкале Виккерса; исследования плотности проводили с помощью пикнометра «MicromeriticsAccuPic II 1340» гелиевого типа; пористость, микроструктуру и размера зерна электродов для электроискровой обработки проводили с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51»; коэффициент трения и интенсивность износа поверхности электроискровых покрытий и контртела определяли на автоматизированной машине трения «Tribometer»; шероховатость поверхности образцов исследовали на профилометре SURTRONIC 25; металлографические исследования (микроструктуру, толщину слоя покрытия, состояние поверхности покрытия) проводили с помощью оптического инвертированного микроскопа «OLYMPUS GX51» и

электронно-ионного сканирующего микроскопа «Quanta 200 3D»; микротвердость покрытий определяли с помощью микротвердомера «AFFRI DM-8» и др.

Методика исследования микротвердости электроискровых покрытий микротвердость устанавливали при помощи автоматизированного микротвердомера «AFFRI DM-8» при нагрузке на индентор 100 г и времени выдержки 15 с по десяти отпечаткам в соответствии с ГОСТ 9450-76.

Исследование микротвердости осуществляли квадратной алмазной пирамидкой с углом при вершине 136° . Нагрузка на индентор составляла от 10...100 г. На основании измеренной площади прямоугольника, который получен на экране пересечением касательных к вершинам отпечатка линий, прибор показывает значение микротвердости по шкале Виккерса. Измерение микротвердости материала проводили через 100 мкм. Среднее значение микротвердости устанавливали по результатам усреднения 10 замеров.

2.2. Методы исследования электроэрозионных порошков, используемых при восстановлении и упрочнении изношенных деталей

Метод электроэрозионного диспергирования основывается на выплавлении частиц металла с поверхности импульсом электрического разряда. Если задано напряжение (расстояние) между электродами, погруженными в жидкий диэлектрик, то при их сближении (увеличении напряжения) происходит пробой диэлектрика – возникает электрический разряд, при этом образуется плазма с высокой температурой.

Так как время, используемое в данном методе обработки электрических импульсов, не превышает 0,01с, то выделяющееся тепло не успевает распространиться вглубь материала (металлических отходов) и даже незначительной энергии оказывается достаточно, чтобы разогреть, расплавить и испарить небольшое количество металла. Кроме того, давление, развиваемое частицами плазмы при ударе об электрод, способствует выбросу

(эрозии) не только расплавленного, но и просто разогретого вещества. Поскольку электрический пробой, как правило, происходит по кратчайшему пути, то, прежде всего, разрушаются наиболее близко расположенные участки электродов. При приближении одного электрода заданной формы (инструмента) к другому (заготовке) поверхность последнего примет форму поверхности первого. Производительность процесса, качество получаемой поверхности в основном определяются параметрами электрических импульсов (их длительностью, частотой следования, энергией в импульсе) [55].

Электроискровая обработка была предложена учёными Н.И. Лазаренко и Б.Р. Лазаренко в 1943 г. Она основана на использовании искрового разряда. При этом в канале разряда температура достигает 10000°С, развиваются значительные гидродинамические силы, но сами импульсы относительно короткие и, следовательно, содержат мало энергии, поэтому воздействие каждого импульса на поверхность материала невелико. Метод позволяет получить хорошую поверхность и используется в основном при прецизионной обработке небольших деталей, мелких отверстий, вырезке контуров твердосплавных штампов проволочным электродом [54-56].

2.3. Методика исследования износостойкости поверхности и коэффициента трения покрытий

Коэффициент трения и интенсивность износа поверхности образца и контртела измеряли при помощи автоматизированной машины трения «Tribometer» фирмы «CSM Instruments» (Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания «шарик – диск». Данные испытания позволяют использовать модель Герца, что соответствует международным стандартам ASTM G99-959 DIN50324 и может быть использовано для оценки износостойкости образца и контртела. Образец устанавливали в держателе, перпендикулярно плоскости образца закрепляли стержень, на конце которого находился шарик диаметром 6 мм из стали «StainlessSteel AISI 420» (твёрдость по Виккерсу 5000...8000

НУ). При помощи регулировки датчика перемещения выбирали радиус кривизны поверхности износа. Другой датчик компенсировал силу трения и позволял определить значение коэффициента трения в заданный момент времени.

Подготовка к испытанию включала:

а) три вида калибровки:

- скорости вращения мотора;
- тангенциального смещения датчика;
- радиуса кривизны поверхности износа;

б) установку параметров испытания с помощью специального программного обеспечения (программа «Instrum X forTribometer»).

Задавалась следующая необходимая для испытания информация:

- частота опроса датчика;
- данные об окружающей среде (температура, влажность);
- величина нагрузки, при которой будет проводиться испытание, Н;
- линейная скорость, см/с;
- длина пробега, м, или количество циклов;
- информация о подложке (материал покрытия, материал подложки, вид предварительной очистки образца перед испытанием);
- информация о контртеле (материал покрытия, материал контртела, вид предварительной очистки контртела перед испытанием, размер, геометрия).

Испытания проводили на воздухе при нагрузке 5 Н и линейной скорости 10 см/с, с радиусом кривизны поверхности износа 5...9 мм, путь трения составлял 100, 200 и 500 м.

Интенсивность износа образца и статистического партнера (шарика) оценивали по формуле

$$W=V/(P l),$$

где W – интенсивность износа, Н-1 м-1; V – объем удаленного материала, мм³, P – нагрузка, Н; l – путь трения, м.

Определив диаметр поверхности износа шарика при помощи оптического инвертированного микроскопа «Olympus GX 51», объем удаленного материала на шарике рассчитывали следующим образом: $V = \pi$

$$h^2 (r - (1/3) h),$$

где $h = r - (r^2 - [d/2]^2)^{1/2}$; d – диаметр износа, мм; r – радиус шарика, мм; h – высота сегмента, мм.

Объем удаленного материала образца определяли по сечению дорожки износа на поверхности образца с помощью автоматизированного прецизионного контактного профилометра «Surtronic 25».

$$V = s l,$$

где l – длина окружности, мм; s – площадь поперечного сечения дорожки износа, мм²

Состояние поверхностей трения изучали с использованием оптического микроскопа фирмы «Olympus GX 51», который снабжен автоматизированной системой для анализирования изображений «SIMAGIS Photolab», и электронно-ионного сканирующего микроскопа «Quanta 200 3D».

2.4. Методика исследования микроструктуры, микротвердости и прочности сцепления электроискровых покрытий

Металлографические исследования (микроструктуру, толщину слоя покрытия, состояние поверхности покрытия) производили на оптическом инвертированном микроскопе «OLYMPUS GX51», который оснащен системой «SIMAGIS Photolab» для автоматизированного анализа изображений и электронно-ионного сканирующего микроскопа «Quanta 200 3D».

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°. Смывали частицы абразива водой и подвергали

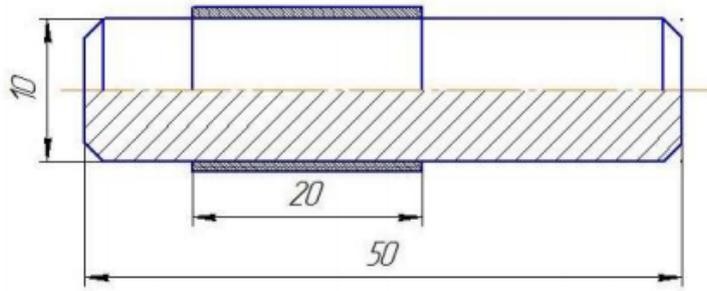
полированию на круге суспензиями из оксидов металла (Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , Al_2O_3).

Когда достигали зеркального блеска, поверхность шлифа промывали водой, спиртом, после чего просушивали фильтровальной бумагой. Травление проводилось путем погружения в раствор (на несколько секунд). После травления поверхность промывали водой, спиртом и сушили с помощью фильтровальной бумаги. Реактив для травления стали: 5 % –ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Микротвердость устанавливали при помощи автоматизированного микротвердомера «AFFRI DM-8» при нагрузке на индентор 100 г и времени выдержки 15 с по десяти отпечаткам в соответствии с ГОСТ 9450-76. Исследование микротвердости осуществляли квадратной алмазной пирамидкой с углом при вершине 136° . Нагрузка на индентор составляла от 10...100 г. На основании измеренной площади прямоугольника, который получен на экране пересечением касательных к вершинам отпечатка линий, прибор показывает значение микротвердости по шкале Виккерса. Измерение микротвердости материала проводили через 100 мкм. Среднее значение микротвердости устанавливали по результатам усреднения 10 замеров.

При нанесении электроискровых покрытий наноструктурный электродный материал образует на поверхности деталей слой покрытия, прочно сцепленный с поверхностью.

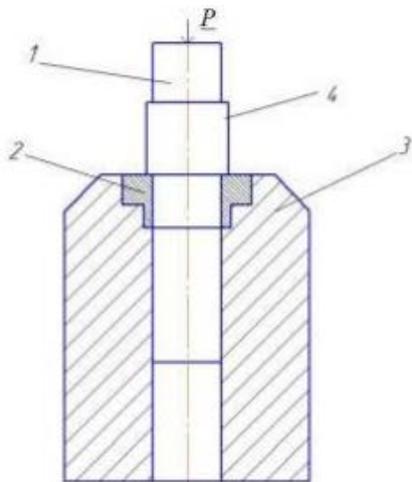
Испытания по определению прочности сцепления электроискрового покрытия с восстанавливаемой деталью проводились методом сдвига. Суть метода состоит в нанесении на образец цилиндрической формы (Рисунок 2.1) кольцевого покрытия. Затем данный образец продавливается при помощи гидравлического пресса через матрицу. Под воздействием возникающих касательных напряжений следует срезание нанесенного на поверхности образца электроискрового покрытия. При этом сила, воздействующая на сдвиг образца характеризует сцепляемость покрытия.



2.1.Рисунок – Образец с покрытием

Процесс испытания происходит с использованием гидравлического прессы с встроенным манометром для измерения нагрузки и заданной постоянной скоростью хода штока. При испытании регистрируется максимальная нагрузка, которая предшествовала сдвигу образца через матрицу.

Испытания проводятся в соответствии с схемой изображенной на рисунке 2. Образец с покрытием устанавливают в матрицу, стоящую в корпусе приспособления. На образец воздействует шток прессы с силой P



1– образец; 2 – матрица; 3 – корпус;
4 – слой электроискрового
покрытия

Рисунок 2.2. – Схема испытания образцов на сдвиг

3.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Исследования электроэрозионных порошков, используемых при восстановлении и упрочнении изношенных деталей

Для производства порошков методом ЭЭД основными изменяемыми параметрами процесса являются: гранулометрический состав, производительность процесса, в зависимости от электрических режимов установки ЭЭД. От химического состава исходных материалов и химического состава применяемой рабочей жидкости (РЖ) зависит химический состав порошка. Дистиллированная вода была выбрана в качестве РЖ из-за невысокой стоимости и оптимального химического состава [53-54].

Исследована зависимость массы получаемого за 1 ч порошка Р6М5 от рабочей частоты генератора импульсов при напряжении на электродах реактора $U=120$ В, емкости разрядных конденсаторов $C=5$ мкФ, расстоянии между электродами реактора $l=100$ мм., а также представлен график ее зависимости (рисунок 3.1).

При помощи эксперимента была установлена прямо пропорциональная зависимость массы получаемого порошка от частоты следования импульсов. Линейная функция аппроксимации этой зависимости (с достоверностью аппроксимации $R=0,998$) будет иметь следующий вид:

$$M = 0,005 \cdot f, \quad (3.1)$$

где M – это масса получаемого порошка, г; f – это частота следования импульсов, Гц.

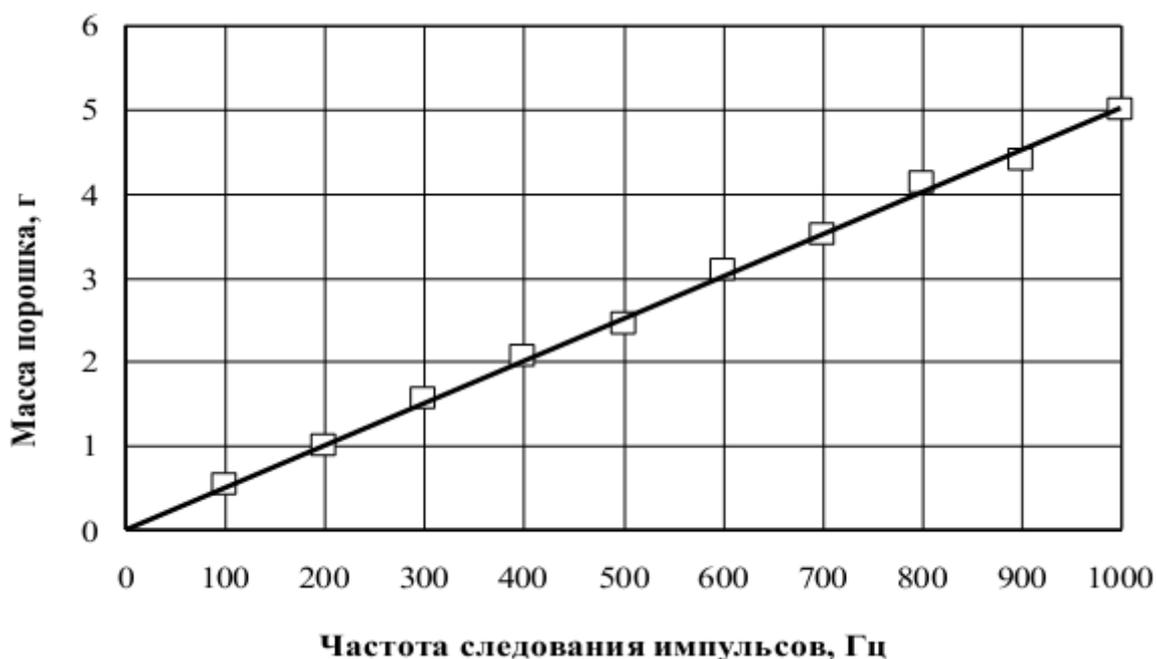


Рисунок 3.1. Зависимость массы получаемого порошка Р6М5 от рабочей частоты установки ЭЭД ($U=120$ В, $C=5$ мкФ, $l=100$ мм).

Как было указано выше, массовая производительность в основном зависит от среднего размера частиц порошка, в свою очередь, зависящий от энергии импульса (энергии заряда – разряда разрядных конденсаторов):

$$E = \frac{C U^2}{2},$$

где C – это емкость разрядных конденсаторов, Ф; U – это напряжение на электродах реактора, В. Менять энергию импульса возможно либо изменением напряжения на электродах реактора, либо изменением емкости разрядных конденсаторов.

От метода получения порошков зависят их размеры, которые могут варьироваться в достаточно больших пределах, начиная от долей микрон до сотен и даже тысяч микрон.

Полученные методом ЭЭД, из отходов быстрорежущих сталей (БРС)Р6М5 порошок обладает довольно широким диапазоном расположения частиц по размерам – от нескольких нанометров до сотен микрон [54, 57].

Возможно получать порошки с различным средним размером частиц при изменении энергии импульса. И даже если порошок был получен на одном режиме, он также будет обладать широким диапазоном изменения частиц по размерам, как следствие, реализации в одно и то же время трех механизмов образования частиц. Полученные кристаллизацией паров материала хлопьевидные частицы обладают размером от нескольких нанометров до 1 микрона (как правило). В основном они создают агломераты либо облепляют самые крупные частицы.

Кристаллизацией расплавленного материала образуются эллиптические и сферические частицы диаметром от десятков нанометров до сотен микрон, в зависимости от режима их получения. Хрупким разрушением материала получены осколочные частицы, которые обладают средним размером (от единиц до сотен микрон), образованные в результате термического и механического на них воздействия при электроэрозионном диспергировании. Методом ЭЭД получен средний размер частиц порошка, данный размер частиц зависит от энергии разряда (импульса) и напряжения на электродах реактора (напряжения питания установки ЭЭД), напряжения пробоя РЖ, емкости разрядных конденсаторов, размеров диспергируемого материала, а также его эрозионной стойкости, геометрических параметров реактора (расстояние между электродами). Для того чтобы получать порошки заданных размеров, рациональнее изменять емкость разрядных конденсаторов либо напряжение на электродах реактора, зависящие от напряжения питания установки ЭЭД (генератора импульсов), после чего постоянными оставлять все остальные параметры. При других равных условиях, с повышением емкости разрядных конденсаторов либо напряжения на электродах реактора средний размер частиц порошка, как правило, повышается из-за увеличения энергии импульса (энергии заряда-разряда разрядных конденсаторов), которая идет на расплавление части материала.

Результаты анализа гранулометрического состава порошка БРС марки Р6М5, который получен в водной среде представлены в таблице 3.1 и на рисунке 3.2.

Таблица 3.1

Результаты исследования распределения по размерам частиц порошка

Показатель	Размер, мкм
D10 (10% частиц)	0,606
D50 (50% частиц)	10,435
D90 (90% частиц)	45,348
d[4,3] Объемный средний диаметр	16,88
d[3,2] Средний диаметр по площади поверхности	2,11
d[3,0] Средний диаметр по отношению к объему	0,79
d[2,0] Средний диаметр по отношению к площади	0,48
d[1,0] Средний диаметр по отношению к длине	0,41

Примечание – D50 (50% частиц) – 10,435 мкм, то есть частиц, размером меньше или равно 10,435 мкм, в порошке содержится 50% от общего объема. На рисунке 4.2 представлена: интегральная кривая 1 и гистограмма 2. Любая точка интегральной кривой (левая шкала) показывает, на сколько процентов образца имеет размер частиц меньше либо равно данного.

Гистограмма (правая шкала) показывает количество образца с данным размером частиц.

(U=135 В, C=5 мкФ, 1 – интегральная кривая; 2 – гистограмма)

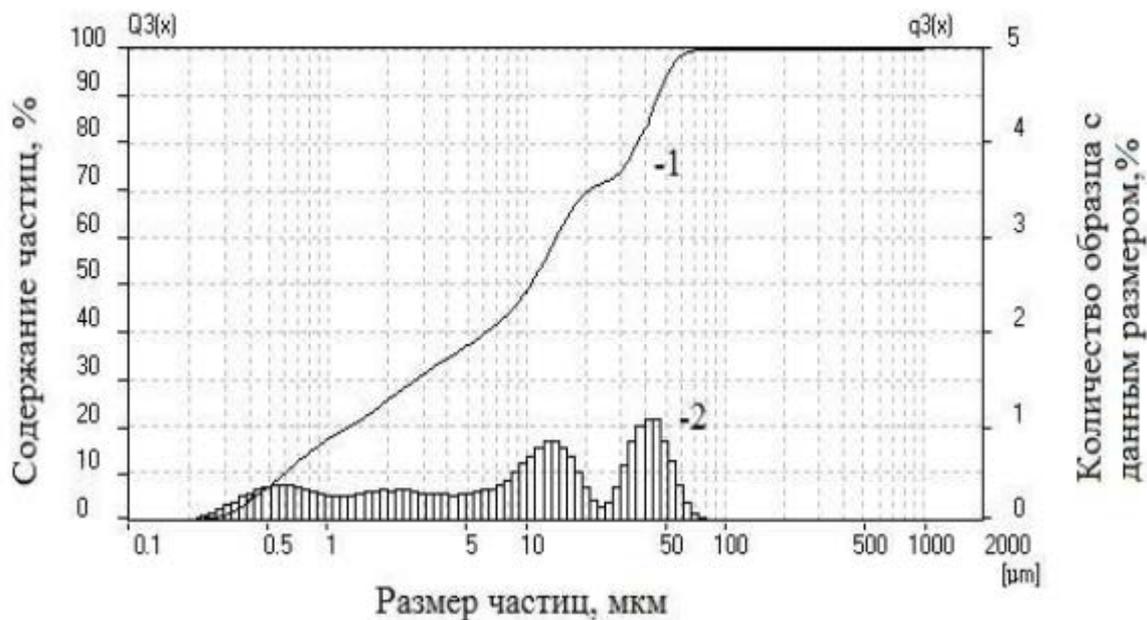


Рисунок 3.2 – Гранулометрический состав порошка БРС Р6М5

На основании данных результатов, которые приведены в таблице 3.1 и на рисунке 3.2, было установлено, что средний размер частиц составляет 16,88 мкм, арифметическое значение – 16,883 мкм, удельная площадь поверхности – 28476,27 см/см. Информация дифракционных картин может быть использована не только для определения размера частиц, но и для анализа их формы. Частицы несферической формы рассеивают излучение в их предпочтительных пространственных направлениях. Если в лазерный пучок попадает очень большое количество частиц, то на основе получаемой информации можно проанализировать формы. Установлено, что коэффициент элонгации (удлинения) частиц размером 10,435 мкм составляет 1,25, что говорит о сферической форме частиц порошка.

В зависимости от химической природы металла, а также способа его получения частицы порошка могут обладать различной формой – сферической, каплеобразной и, отчасти, сферической, губчатой, тарельчатой, волокнистой, осколочной и лепестковидной [57]. Значительное влияние оказывает форма частиц порошков, а также состояние их поверхности, на прочность, прессуемость, насыпную

плотность, однородность и плотностью прессовок. Самой меньшей насыпной плотностью и самой большей прочностью обладают прессовки из порошков с дендритной формой частиц. И наоборот, порошки, которые имеют частицы сферической формы, обладают максимальной насыпной плотностью, но слабо прессуются. Большое давление необходимо для получения из них прессовок с достаточной прочностью. Порошки, которые имеют частицы чешуйчатой формы, очень плохо прессуются, а полученные из них прессовки склонны к расслоению и растрескиванию. Волокнистые порошки слабо прессуются и используются в основном в качестве армирующих (упрочняющих) добавок для создания волокнистых материалов.

Для того чтобы изучить морфологии и формы частиц порошков, которые получены методом ЭЭД из отходов быстрорежущей стали Р6М5 в кислородсодержащей рабочей жидкости, на растровых электронных микроскопах «Quanta 600 FEG» были сделаны снимки, которые представлены ниже (рисунок 3.3, а-г). Форма частиц порошка зависит от того, в каком виде материал выбрасывается из лунки в процессе ЭЭД. В основном в порошке преобладают частицы, которые получены кристаллизацией расплавленного материала (жидкая фаза). Как правило, они обладают правильной сферической либо эллиптической формой.

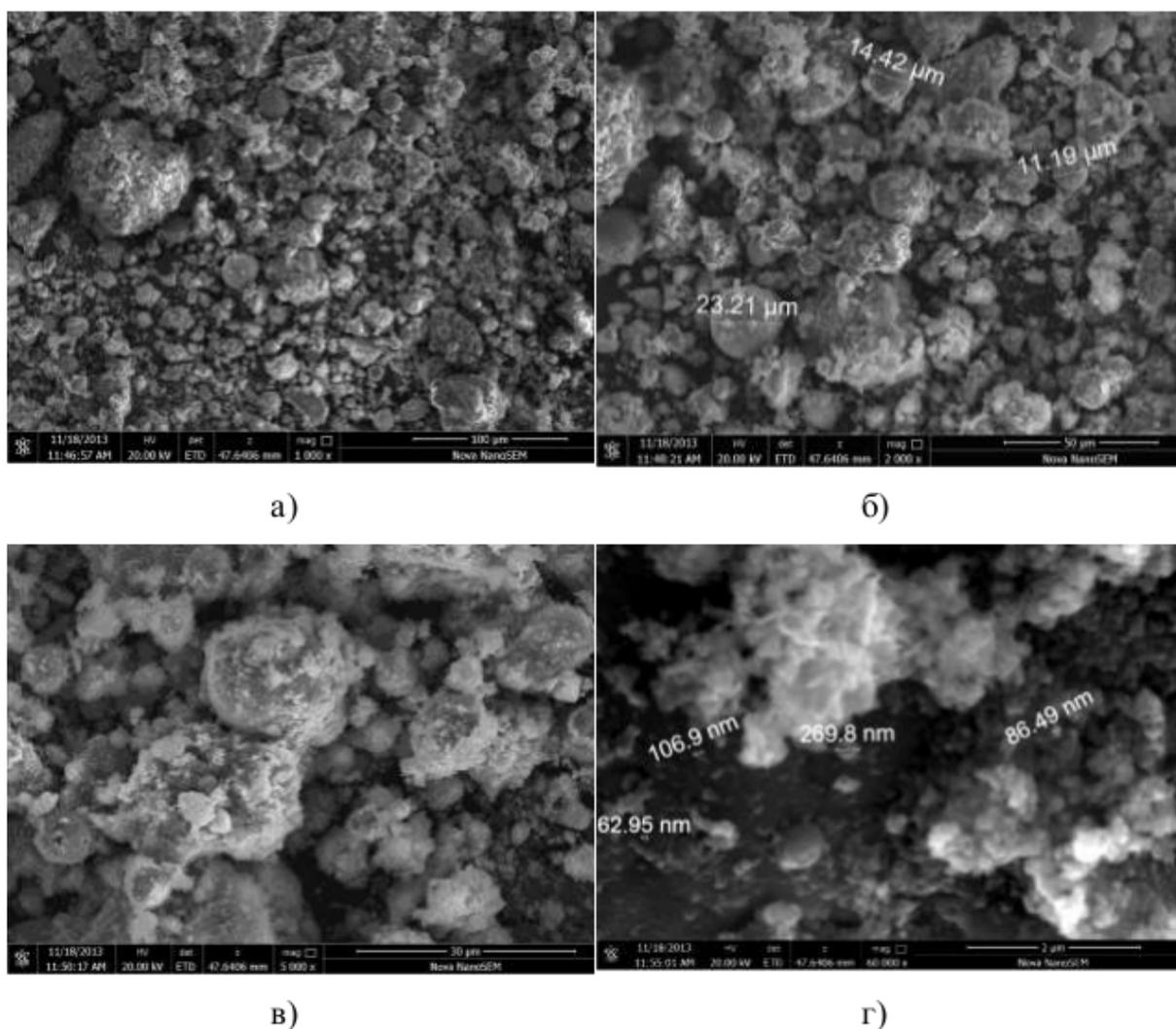


Рисунок 3.3 – Порошок БРС Р6М5

Те частицы, которые образуются путем кристаллизации кипящего материала (паровая фаза), как правило, обладают неправильной формой, их размер на порядок меньше частиц, которые образуются в жидкой фазе, и в основном они агломерируются друг с другом на поверхности других частиц. Эти частицы в процессе ЭЭД больше всего подвержены фазовым и химическим изменениям. Из анализа исследований К. К. Намитокоев [55, 56], пришел к выводу, что паровая фаза формируется при высокой мощности теплового воздействия и процесс ее эрозии происходит взрывообразно. Это критическое значение будет близким к 10 Вт/м , но различным для разных материалов. Применяя уравнение температурного поля, которое описывает тепловые процессы на поверхности анода под воздействием на него канала искрового разряда [59], удалось установить,

что повышение продолжительности импульса ведет к увеличению диаметра канала разряда, что, в свою очередь, ведет к уменьшению плотности мощности теплового воздействия. Следовательно, чем меньше диаметр канала разряда, тем больше количество паровой фазы. Выбрасываемые из лунки частицы в твердом состоянии (твердая фаза) формируются под действием ударных волн канала разряда и термических напряжений, также частицы твердой фазы формируются при хрупком изломе острых граней и краев диспергируемого материала во время процесса ЭЭД при его перемешивании. Данные частицы обычно обладают неправильной осколочной формой, иногда могут быть с оплавленными краями и гранями. В процессе диспергирования пластичного материала обычно не обнаруживается частиц, которые получены хрупким разрушением. При ЭЭД [60], хрупкое разрушение быстрорежущей стали начинает происходить лишь при увеличении энергии импульса свыше 0,15...0,25 Дж., но определенная доля частиц в порошке, которая образовалась в результате хрупкого излома при перемешивании, всегда присутствует. В конечном итоге электроэрозионные частицы порошка, полученные из отходов быстрорежущей стали в кислородсодержащей рабочей жидкости, имеют сферическую и эллиптическую формы, а также образуются конгломераты и частицы осколочной формы. В процессе электроэрозионного диспергирования частицы металла выходят из канала разряда в расплавленном виде и мгновенно кристаллизуются и закаляются в рабочей жидкости, приобретая правильную форму. При большой разнице температур сталкивающихся частиц возможно их слипание с появлением непрочных границ.

С целью выявления [61]распределения элементов по поверхности электроэрозионного порошка, при помощи растрового электронного микроскопа «QUANTA 600 FEG» и интегрированного в него анализатора рентгеновского излучения фирмы «EDAX» был

выполнен рентгеноспектральный микроанализ и получены следующие результаты (рисунки 3.4 – 3.8).

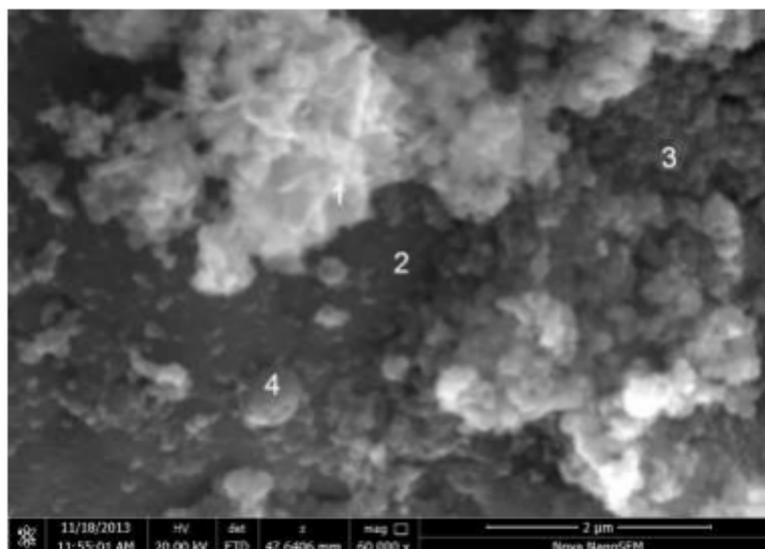


Рисунок 3.4 – Точки проведения рентгеноспектрального микроанализа порошка P6M5

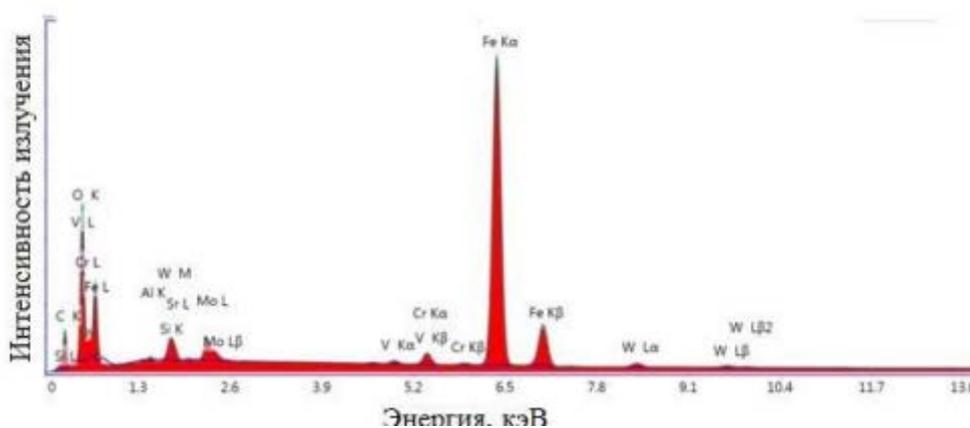


Рисунок 3.5 – Рентгеноспектральный микроанализ порошка P6M5 в точке 1.

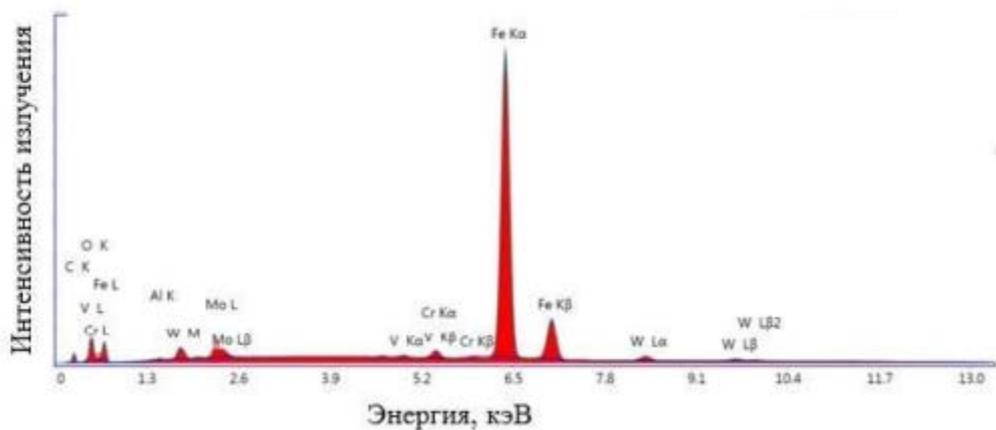


Рисунок 3.6 – Рентгеноспектральный микроанализ порошка Р6М5 в точке 2

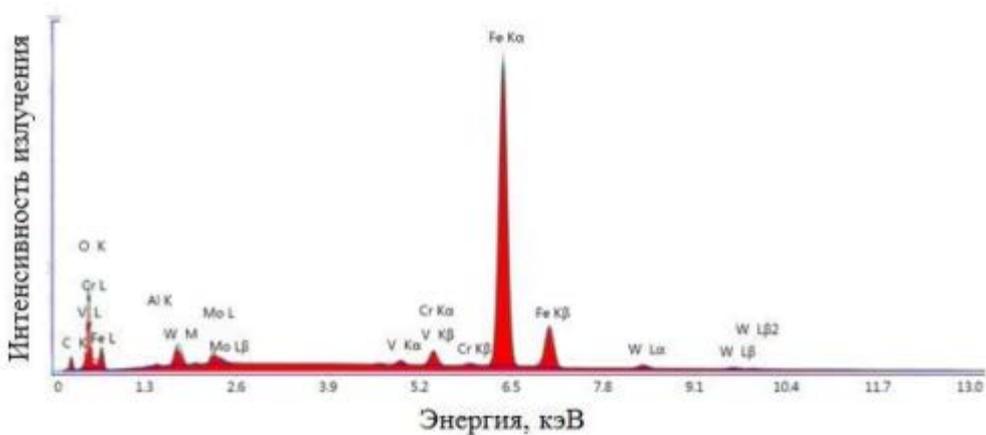


Рисунок 3.7 – Рентгеноспектральный микроанализ порошка Р6М5 в точке 3

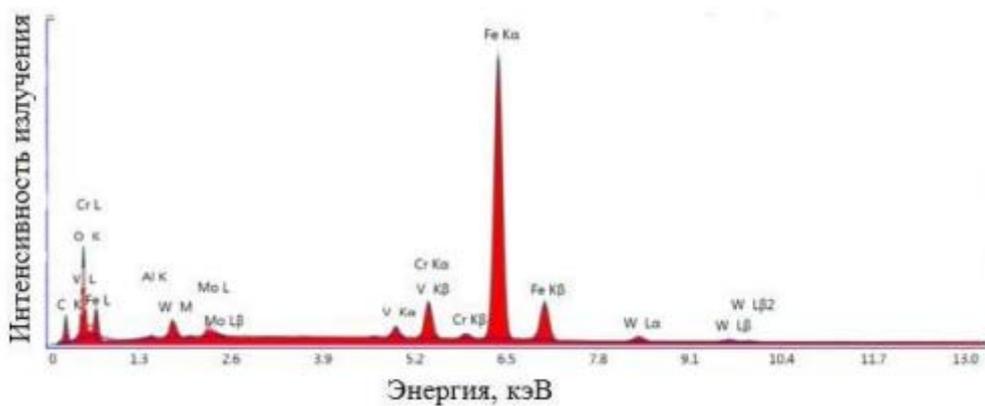


Рисунок 3.8 – Рентгеноспектральный микроанализ порошка Р6М5 в точке 4.

В таблице 3.2 приведены результаты исследования рентгеноспектрального микроанализа порошков.

Таблица 3.2

Результаты рентгеноспектрального микроанализа порошка
быстрорежущей стали Р6М5

Элемент	C	O	Al	Mo	V	Cr	Fe	W
Вес, %	7,145	9,5	0,15	1,95	0,64	1,9	73,37	5,17

Таким образом, рентгеноспектральный микроанализ позволил определить элементный состав микрообъектов частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов быстрорежущей стали по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению[62].

По результатам представленных обобщенных данных установлено, что основными элементами в порошке, полученном методом электроэрозионного диспергирования инструментальной быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73) в дистиллированной воде, являются: кислород, железо, углерод, молибден и вольфрам.

От свойств полученного порошка напрямую зависит область их применения, важную роль в этом выполняет их структура. Для проведенияданного анализа был выбран рентгеновский дифрактометр фирмы «ARL9900 IntellipowerWorkstation». Результаты рентгеноструктурного анализа порошка, полученногометодом ЭЭД из отходов быстрорежущей стали марки Р6М5 в кислородсодержащей рабочей жидкости, представлены ниже (рисунок 3.9)[63-67].

Установлено, что при процессе диспергирования отходов быстрорежущей стали происходит формирование мгновенно закристаллизованных порошков с высокими скоростями охлаждения (102... 1010°С/с).

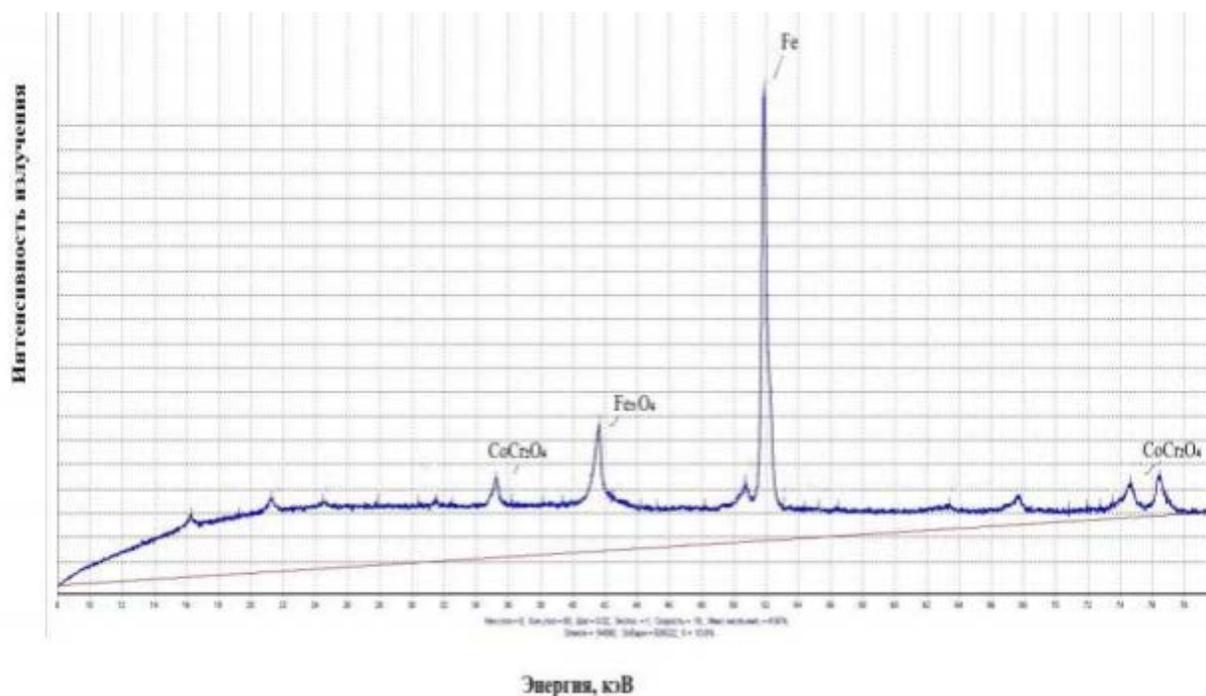


Рисунок 3.9 – Дифрактограмма порошка Р6М5

При изучении концентраций элементного и минералогического состава образца, были получены результаты, представленные в таблице 4.3.

Таблица 3.3

Основные фазы порошка быстрорежущей стали

№ п/п	Основные фазы			Эталоны ICDD
	Формула	Название	Основное отражение, Å	
1	W	Вольфрам	1,98	70-1523
2	Fe	Железо	2,04	85-1410
3	Fe ₃ O ₄	Магнетит	2,52	75-1609
4	CoCr ₂ O ₄	Оксид кобальтохрома	2,51	80-1668

Согласно исследованиям рентгеноструктурного анализа установлено, что в порошке, полученном методом ЭЭД отходов быстрорежущей стали Р6М5 в дистиллированной воде, основными фазами являются железо (Fe)вольфрам W, магнетит Fe₃O₄и оксид кобальтохрома CoCr₂O₄.

По результатам исследования была определена удельная площадь поверхности (пористость) заготовок (использовали одно- и пятиточечный метод БЭТ), данная площадь составляет 0,8462 см³/г. Исследования проводили на оптическом инвертированном микроскопе «OLYMPUS GX51», оснащённом системой автоматизированного анализа изображений «SIMAGIS Photolab» при постоянной температуре $t = 23,56$ °С [68].

Твёрдость определяли при помощи полуавтоматического микротвердомера «Instron 402 MVD». Результаты исследования представлены в таблице 3.4. Среднее значение твёрдости заготовок по микрошлифу по методу микро Вickers при нагрузке на индентор 30 Н составило 477 HV.

Таблица 3.4

Твёрдость заготовок, HV при нагрузке 30 Н

Номер пробы	Показания HV	Номер пробы	Показания HV
1	510	6	476
2	480	7	480
3	434	8	446
4	469	9	469
5	408	10	514
Среднее значение	477HV		

Была исследована плотность заготовок для электродов, которые выполнены методом горячего прессования с пропуском высокоамперного тока из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов стали марки Р6М5. Для этого на пикнометре «Micromeritics AccuPic II 1340» гелиевого типа исследовали заготовку электродного материала. Определение плотности заключалось в исследовании объема 10 проб известной массы. Среднее значение объема

всех проб составило $0,7534 \text{ см}^3$, в итоге получена плотность заготовки – $6,5 \text{ г/ см}^3$.

Исследования микроструктуры и элементного состава электродов для ЭИО деталей проводились методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе фирмы «Quanta 200 3D». (рисунок 3.10, а-в).

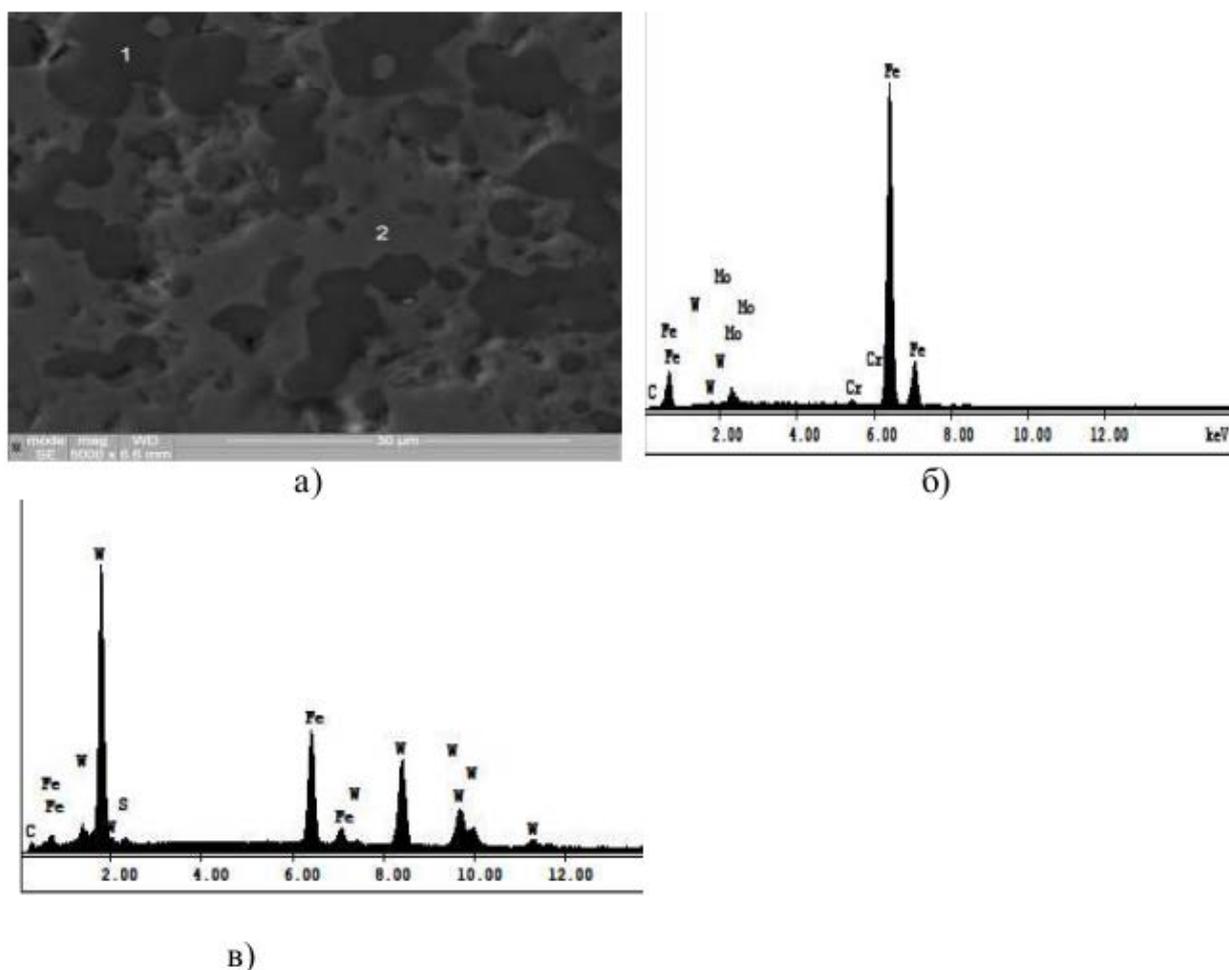


Рисунок 3.10 – Микроструктура

а – элементный состав сплава,изготовленного из порошка, полученного электроэрозионнымдиспергированием в воде б – в точке 1; в – в точке 2

Далее в точках 1 и 2, указанных на полученном снимке, были выбраны спектры, характеризующие рентгеновское излучение на поверхности образца (рисунок 3.10, б-в).

Точкам на рисунках соответствуют спектры характерного рентгеновского излучения, причем пики соответствуют каждому химическому элементу на данном спектре.

По результатам данного исследования элементного состава было установлено, что основными элементами изготовленного наноструктурного электрода являются: Fe, W, Mo, Cr, C[69-72].

3.2. Исследования электроискровых покрытий

Было установлено, что при использовании в качестве контртела (шарика) стали марки «StainlessSteel AISI 420» после многократных проходов по исследуемой поверхности экспериментальных образцов (подложки из стали 30ХГСА) на соответствующем пути трения происходит следующее:

- 100 м – интенсивное изнашивание контртела;
- 200 м – интенсивное изнашивание контртела;
- 500 м – интенсивное изнашивание контртела.

Результаты трибологических испытаний образцов при различных путях трения представлены на рисунке 3.11, а-в.

Результаты трибологических испытаний поверхности трения образцов из стали 30 ХГСА, а также электроискровых покрытий с БРС свидетельствуют о высоком коэффициенте трения последней. Также отмечено, что при испытаниях трибологических образцов с БРС происходит скачок. В данном случае это связано с высокой шероховатостью ($Ra = 2,14$ мкм) и износ характеризуется сглаживанием твердых выступов поверхности образца.

3.3. Исследования износостойкости поверхности покрытий

Оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после проходов по исследуемой поверхности экспериментальных образцов (электроискровых покрытий с БРС и подложки из стали 30ХГСА) представлено на рисунке 4.12, а-е.

- а) путь трения 100 м

- б) путь трения 200 м
- в) путь трения 500 м
- г) путь трения 100 м
- д) путь трения 200 м
- е) путь трения 500 м

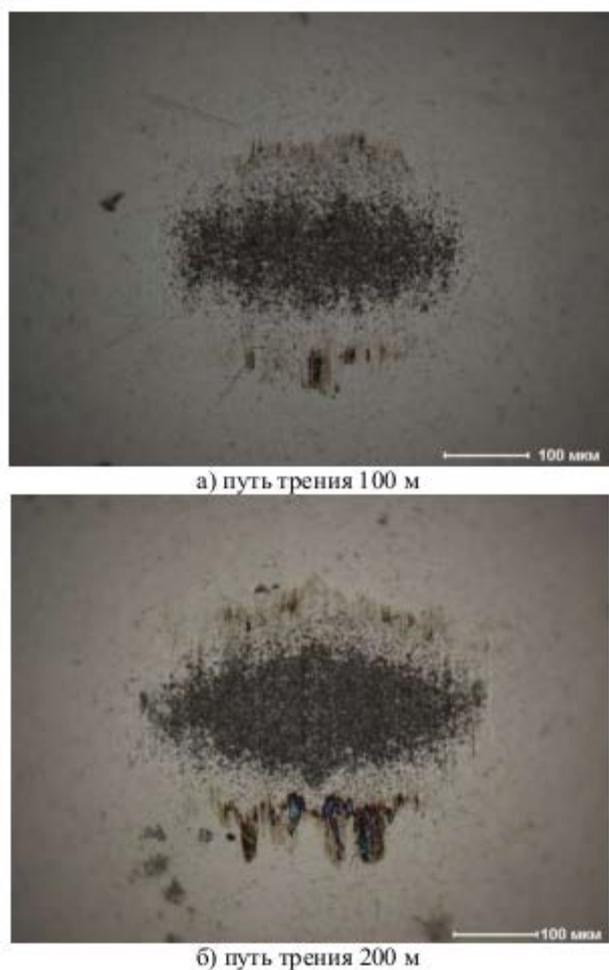


Рисунок 3.12 – Оптическое изображение пятна износа контртела (шарика) после проходов по исследуемой поверхности экспериментальных образцов: электроискровых покрытий с БРС (а-в); подложки из стали 30ХГСА (г-е)

Оптическое изображение пятна износа показало, что при использовании в качестве контртела (шарика) из стали марки «StainlessSteel AISI 420» после многократных проходов по исследуемой поверхности экспериментальных образцов (электроискровых покрытий с БРС) на соответствующем пути трения происходит следующее:

- 100 м – налипание продуктов изнашивания образца на контртело;
- 200 м – налипание продуктов изнашивания образца на контртело;
- 500 м – частичный износ контртела и налипание продуктов изнашивания образца на контртело.

3.4. Исследования микроструктуры, микротвердости электроискровых покрытий

Результаты исследования образцов приведены на рисунке 3.14. а), б).
а – поперечный шлиф («Quanta 200 3D»), б – поверхность («OLYMPUS GX51»)

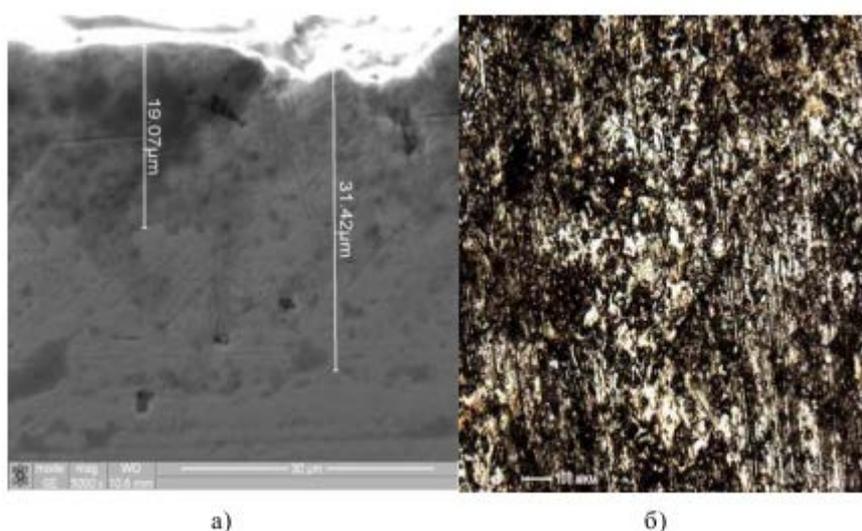


Рисунок 3.14 – Микроструктура образца

Экспериментально было установлено, что электроискровые покрытия, полученные электродным материалом из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали, имеют толщину от 19,07 мкм до 31,42 мкм.

Результаты измерений микротвердости подложки и электроискрового покрытия приведены в таблице 3.6.

Значения измеренной микротвердости HV, ГПа

Номер отпечатка	Подложка (Сталь 30ХГСА)	Покрытие (БРС)
1	1,88	2,22
2	1,98	2,86
3	2,02	4,61
4	2,11	12,14
5	2,19	9,29
6	2,13	9,46
7	2,15	15,06
8	2,20	4,39
9	2,17	6,50
10	2,11	5,12
Среднее значение	2,094	4,36

Отмечено, что среднее значение микротвердости покрытия, которое получено электродным материалом из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали, имеет большую микротвердость, чем у подложки, в 2,1 раза.

Разброс значений микротвердости по поверхности связан с неравномерным распределением частиц БРС в электроискровом покрытии (рисунок 3.14, б).

3.5. Исследования пористости электроискровых покрытий

Пористость нанесенного слоя это наличие либо отсутствие в нем микропор. Поры присущи в той или в иной степени практически всем покрытиям. Они отсутствуют только в диффузионных слоях. При режимах с низкой энергией импульса и в материалах, образующих тонкие слои, пористость минимальна. С увеличением энергии импульсов и толщины слоя величина, а также количество микропор увеличивается [73-77]. Пористость нанесенного покрытия определяется с помощью микроскопа «Quanta 200 3D» на поперечном сечении шлифа по следующей формуле:

– суммарная площадь пор на исследуемом сечении;

– площадь i поры; A

общ

– площадь участка исследуемого покрытия на поперечном сечении шлифа.

Величина, обратная пористости – плотность, является отношение площади поверхности без пор к общей площади:

Исследования в работах показали, что величина пористости покрытий электроискровой обработки материалов наноструктурными электродами составляет 5...8%.

3.6. Исследования прочности сцепления электроискровых покрытий

Для испытаний прочности сцепления на срез образец был взят образец цилиндрической формы из стали 30ХГСА, аналогичный материалу вала . Диаметр образца 10 мм, длина 50 мм. Покрытие наносили в виде кольцевого пояса расстоянии 15 мм от края образца.

Для расчета τ прочности сцепления нагрузка (F), предшествующая разрушению покрытия определяли с помощью графика на рисунке 3.15.

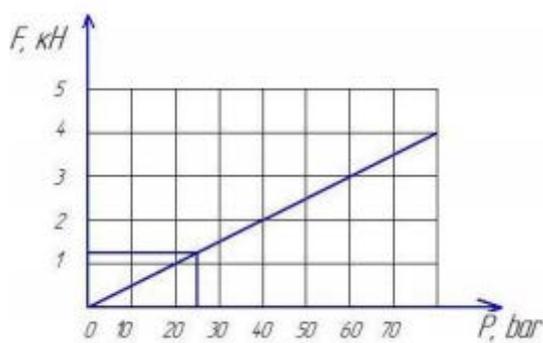


Рисунок 3. 15 – График зависимости силы, развиваемой прессом, в зависимости от давления в гидросистеме.

Образец при помощи гидравлического пресса продавливали через матрицу. Соединение «образец без покрытия – матрица» образует посадку

$$d=10 (H7/k6).$$

Прочность покрытия при разрушении в виде среза (когезионная) оценивалась по формуле (3.4).

Электроискровое покрытие на образец наносили установке «UR-121».

Параметры обработки: режим 7,

Уразр=220 В, С=360 мкф, фимп=100 Гц.

Толщина покрытий до 0,01 мм.

Прочность покрытия при разрушении в виде среза (когезионная) оценивалась по формуле (3.4).

$$\tau_{\sigma} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h_n} = \frac{12000}{3.14 \cdot 10^{-4}} = 38,1 \text{ МПа}$$

Таким образом, с учетом исходных и полученных данных прочность сцепления электроискрового покрытия, полученного с использованием наноструктурированного электрода, прочность сцепления составила 38,1 МПа.

Полученные значения прочности сцепления коррелируют с полученными ранее экспериментальными данными.

После испытаний на поверхности детали имеет место сплошное электроискровое покрытие, что указывает на отсутствие четкой границы раздела между нанесенным покрытием и основным металлом.

Выводы по главе

1. Исследованы состав, структура и свойства порошков, полученных из отходов быстрорежущей стали марки P6M5 методом электроэрозионного диспергирования в кислородсодержащей рабочей жидкости. Определен диапазон размеров частиц порошка, который составил от 3 нм до 50 мкм.

Установлено, что на их состав большое влияние оказывают такие режимы диспергирования, как частота следования импульсов, напряжение и емкость конденсаторов. Частицы порошка в основном имеют сферическую и эллиптическую форму. Основными элементами в порошке являются железо, кислород, углерод, вольфрам и молибден, а основными фазами – железо (Fe) вольфрам (W), магнетит (Fe_3O_4) и оксид кобальтохрома (CoCr_2O_4).

2. По результатам исследования электродов для ЭИО установлено, что удельная площадь поверхности (пористость) заготовок использовали одно- и пятиточечный метод БЭТ составляет $0,8462 \text{ см}^3/\text{г}$. Среднее значение твердости заготовок по микрошлифу методом микро Вика при нагрузке 157 на индентор 30Н составило 477 HV. Плотность электрода составила $6,5040 \text{ см}^3/\text{г}$, а основными элементами изготовленного наноструктурного электрода являются Fe, W, Mo, Cr, C.

3. Исследованы свойства электроискровых покрытий. Установлен коэффициент трения (μ) при пути 500 м. Среднее значение у подложки из стали марки 30ХГСА составило 0,486, а у электроискрового покрытия – 0,146. Износостойкость образца с электроискровым покрытием выше износостойкости подложки. Шероховатость образцов с электроискровым покрытием составляет Rz 13,2 мкм (Ra 2,14 мкм). Толщина покрытия от 19,07 мкм до 31,42 мкм. Среднее значение микротвердости покрытия, полученного электродным материалом из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали, больше микротвердости подложки в 2,1 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, направленная на совершенствование на основе научных исследований технологии восстановления и поверхностного упрочнения изношенных деталей путем применения электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов, обеспечивающих заданный ресурс.

Основные результаты и выводы

1. Научно обосновано применение эффективной технологии для восстановления изношенных деталей путем применения новых электроискровых покрытий на основе электроэрозионных наноматериалов.

Разработанная технология отличается технологической гибкостью, дешевизной, простотой, не требует использования дорогих и дефицитных материалов и оборудования, а также отвечает требованиям экологической безопасности. Предлагаемая технология может быть использована для восстановления широкой номенклатуры деталей, тракторов и других машин.

2. Экспериментально установлены зависимости влияния свойств электроэрозионных материалов на свойства электроискровых покрытий восстановленных деталей. Показано, что содержание наноразмерных частиц в электродном материале способствует улучшению физико-механических свойств электроискровых покрытий. В частности, среднее значение микротвердости электроискрового покрытия (4,36 HV), полученного электродным материалом из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали, больше микротвердости подложки (2,09 HV) в 2,1 раза.

3. Экспериментально установлены зависимости влияния свойств электроискровых покрытий на ресурс восстановленных деталей.

4. Экспериментально установлены рациональные режимы нанесения износостойких покрытий на изношенные валы турбокомпрессоров,

обеспечивающие необходимый комплекс физико-механических свойств покрытиям и заданный ресурс валам в целом (частота вращения детали, мин-1 – 50; подача электрода, мм/мин – 0,4...0,5).

5. Изучены характеристики износостойкости электроискровых покрытий валов, полученных с использованием электроэрозионных наноматериалов. Показано, что среднее значение коэффициента трения (μ) у электроискрового покрытия составило 0,146 вместо 0,486 без покрытия, что в 3,3 раза ниже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов В. М. Техническое обслуживание и ремонт / В. М. Власов, С. В. Жанказиев С. М. Круглов [и др.]. - 2-е изд., стер. - М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 480 с.
2. Молодык Н. В., Восстановление деталей машин / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин - М.: Машиностроение, 1989. - 480 с.
3. Агеев Е. В. Исследование и практическое применение порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов: Дис. ... д-ра. техн. наук: / Агеев, Евгений Викторович. - М., 2012. - 360 с.
4. Шадричев В. А. Основы технологии автостроения и ремонт / В. Л. Шадричев. – Л.: Машиностроение, 1976. - 560 с.
5. Шадричев В. А. Основы выбора рационального способа восстановления деталей металлопокрытиями / В. А. Шадричев. - М.: Машгиз, 1962.- 266 с.
6. Новиков А. Н. Восстановление и упрочнение деталей: учебное пособие / А. Н. Новиков, М. П. Стратулат, А. Л. Севостьянов. – Орловский государственный технический университет. – Орел, 2006. – 336 с.
8. Новиков А. Н. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочненного слоя, нанесенного микродуговым оксидированием на алюминиевую деталь / А. Н. Новиков, Ю. А. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1998. - N2.- С. 27–28.
9. Новиков А. Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами: Дис. ... д-ра. техн. наук: / Новиков Александр Николаевич. – М., 1999. – 346 с.
10. Бурумкулов Ф. Х. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф. Х. Бурумкулов, П. П. Лезин, П. В. Сенин [и др.]; – МГУ им. Н. П. Огарева. – Саранск: Тип. «Красный Октябрь», 2003. – 504 с.

11. Бурумкулов Ф. Х. Восстановление и упрочнение деталей электроискровым методом / Ф. Х. Бурумкулов, А. В. Беляков, Л. М. Лельчук, [и др] // Сварочное производство.– 1998.– № 2.–С.23–31.

12. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И.В.Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977.– 526 с.

13. Семенихин Б.А. Исследование и разработка процесса получения порошков заданного гранулометрического состава из отходов твердых сплавов электроэрозионным диспергированием, их аттестация и использование для получения износостойких покрытий при восстановлении и упрочнении деталей машин: Дис. ... канд-та. техн. наук: / Семенихин, Борис Анатольевич. – М.,2010. – 150 с.

14. Бурумкулов Ф. Х. Свойства нанокompозитных покрытий, образованных на поверхности стали 20Х электроискровой обработкой стержневыми электродами из сталей 65Г и Св08 / Ф. Х. Бурумкулов, П. В. Сенин, С. А. Величко, [и др]. // Электронная обработка металлов. – 2009. –№6. – С. 22–29.

15. Агеев Е. В. Метод получения наноструктурных порошков на основе системы WC–Co и устройство для его осуществления / Е. В. Агеев, Б.А. Семенихин, Р. А. Латыпов // Фундаментальные и прикладные проблемы машиностроения (Технология – 2010): материалы международной научно-технической конференции – Орел, 2010. – С. 125–129.

16. Зингерман А. С. Электрическая эрозия металлов / А. С. Зингерман. – М.:, 1954. – 115 с.

17.Лазаренко Б. Р. Электрическая эрозия металлов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко. – Л.: Госэнергоиздат, 1994. – 28 с.

18.Мазберг Р. К. Материаловедение / Р. К. Мазберг. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.

19. Гусев В. Н. Анодно-механическая обработка металлов / В. Н. Гусев. – М.: Машгиз, 1952. – 321 с.
20. Киселев М. Г. Электроэрозионная обработка материалов: учебно-методическое пособие / М. Г. Киселев, Ю. Ф. Ляшук, В. Л. Габец. – М.: Технопринт, 2004. – 112 с.
21. Левинсон Е. М. Электроэрозионная обработка металлов / Е. М. Левинсон, В. С. Лев. – Л.: Лениздат, 1972. – 328 с.
22. Немилов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Е. Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 164 с.
23. Немилов Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов / Е. Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. – 160 с.
24. Панов С. В. Влияние природы наноразмерных частиц и способа смешивания на трибологические свойства порошковой стали 70П / В. С. Панов, Ж. В. Еремеева, Г. Х. Шарипзянова, Р. А. Скориков, Г. В. Михеев, Е.
25. Батищев А. Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники / А. Н. Батищев, И. Г. Голубев, В. П. Лялякин. – М.: Информагротех, 1995. – 296 с.
26. Кузнецов С. А. Технология ремонта автотранспортных средств / С. А. Кузнецов. – Кемерово: Куз ГТУ, 2006. – 186 с.
27. Холдерман Дж. Д. Новые двигатели: теория и технологическое обслуживание / Дж. Д. Холдерман, Ч. Д. Митчелл. – М.: Транспорт, 2006. – 664 с.
28. Передерий В. П. Устройство я / В. П. Передерий. – М.: Форум, 2005. – 288 с.
29. Микипорис, Ю. А. Эксплуатация и ремонт автотехники / Ю. А. Микипорис. – Ковров: КГТА, 2002. – 88 с.
30. Пантелеев Ф. И. Восстановление деталей машин / Ф. И. Пантелеев, В. П. Лялякин В. П. Иванов [и др.]: под ред. В. П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

31. Маслов Н. Н. Эффективность и качество ремонта / Н.Н. Маслов. – М.: Транспорт, 1981. – 304 с.
32. Воловик Е. Л.Справочник по восстановлению деталей / Е. Л.Воловик. – М.: Колос, 1981. – 351 с.
33. Батищев А.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники / А. Н.Батищев, И. Г.Голубев, В. П.Лялякин. – М.: Информагротех, 1995. – 296 с.
34. Ермолов Л. С. Основы надежности сельскохозяйственной техники / Л. С. Ермолов, В.М. Кряжков, В. Е. Черкун. – М.: Колос, 1974. – 223 с.
35. Агеев Е. В. Теоретические и нормативные основы технической эксплуатации : учебное пособие / Е. В. Агеев ; Юго-Зап. гос. ун-т.,– Курск , 2008. – 195 с.
36. Кузнецов Е. С. Техническая эксплуатация : учебник для ВУЗов / Е. С. Кузнецов, А. П. Болдин, В. М. Власов под общ.ред. Е. С. Кузнецова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 2001.– 535 с.
37. Сарбаев В. И.Техническое обслуживание и ремонт оборудования: механизация и экологическая безопасность производственных процессов / В.И. Сарбаев, С. С. Селиванов, В.Н. Коноплев, [и др.]. – Ростов н/Д: Феникс, 2004.– 448 с.
38. Бернадский В. В. Техническое обслуживание и ремонт: учебник / В. В. Бернадский. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 448 с.
- 39.Петридис А. В. Порошки, полученные из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного диспергирования / А. В. Петридис // Технология металлов. – 2005. – №8. – С. 31–35.
- 40.Петридис А. В. Разработка и исследование композиционных покрытий для плазменной порошковой наплавки с использованием порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов / А. В. Петридис, А. А. Толкушев, Е. В. Агеев // Известия Курск.гос. тех. ун-т. – 2005. – №2 (15). – С. 49–54.

41.Петридис А. В. Состав и свойства порошков, полученных из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) / А. В. Петридис. // Технология металлов. – 2005. – №6. – С. 13–16.

42.Петридис А. В. Особенности формирования порошков-сплавов при использовании электроэрозионного диспергирования / А. В. Петридис, А. А. Щерба // Материалы и упрочняющие технологии – 89: тезисы и доклады Региональной научно-технической конференции. – Курск,1989. – С. 68–71.

43.Фоминский Л. П. Возможность производства порошков и утилизация металлоотходов электроэрозионными методами / Л. П. Фоминский // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1993. – № 8. – С. 6–8.

44. Малкин В. С. Теоретические основы технической эксплуатации оборудования учебное пособие / В. С. Малкин. – Тольятти: ТГУ, 2004. – 110 с.

45.Фоминский Л. П. Дефектность кристаллической структурыэлектроэрозионных порошков / Л. П. Фоминский, А. С. Мюллер, М. В. Левчук // Порошковая металлургия. – 1985. – №10. – С. 75–78.

46. Гаркунов Д. Н. Триботехника: Учебник для технических вузов / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение,1999. – 336 с.

47. Хрущев М. М. Исследование изнашивания материалов / М. М.Хрущев, М Л. Бабичев. – М.: Наука, 1960. – 352 с.

48. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И.Костецкий. – Киев: Техника, 1970. – 396 с.

49. Буше Н. А. Совместимости трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В.В. Копытько. – М.: Наука, 1981. – 223 с.

50. Карасик И. И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения / И. И. Карасик. – М.: Наука, 1978. – 136 с

51. Чичинадзе А. В. Основы трибологии. (Трение.износ. смазка) Учебник для вузов / А. В.Чичинадзе – М.: Наука, 1975. – 478 с.

52. Крагельского И. В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под редакцией И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

53. Денисов А. С. Обеспечение работоспособности турбокомпрессоров ав-тотракторных двигателей: монография / А. С. Денисов, А. Т. Кулаков, А. Р. Асоян, [и др.]. – Саратов :Изд - во Сарат. гос. техн. ун - та, 2012. – 156 с.

54. Aalund R. Spark plasma sintering [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ceramicindustry.com/articles/spark-plasma-sintering> (дата обращения: 15.07.2015).

55. Намитоков К. К. Об агрегатном составе и строении продуктов электрической эрозии металлов / К. К. Намитоков // Физические основы электроискровой обработки материалов. – М.: Наука, 1996. – С. 74–85.

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

57. Aalund R. Spark plasma sintering [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ceramicindustry.com/articles/spark-plasma-sintering> (дата обращения: 15.07.2015).

58. Bergman Th. L. Fundamentals of heat and mass transfer. 7th ed./ Th. L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, [et al .]. – Wiley, 2011. – 1050p.

59. Kopeliovich D. Spark plasma sintering [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=spark_plasma_sintering (дата обращения: 15.07.2015).

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

61. Петридис А. В. Применение порошков, полученных методом ЭЭД, при плазменной наплавке коленчатых валов / А. В. Петридис, А. А. Толкушев, Е. В. Агеев // Технология металлов. – 2004.– №9. – С. 41–43.

62. ЗолотыхБ. Н. Физические основы электроэрозионной обработки /Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1997. – 42 с.
63. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
64. Верхотуров А. Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д.Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1992. – 180 с.
65. Намитоков К. К. Электроэрозионные явления / К. К. Намитоков. –М.: Энергия, 1978. – 456 с.
66. Намитоков К. К. Об агрегатном составе и строении продуктов электрической эрозии металлов / К. К. Намитоков // Физические основы электроискровой обработки материалов. – М.: Наука, 1996. – С. 74–85.
67. Дворник М. И. Разработка физико-химических и технологических основ переработки вольфрамокобальтового твердого сплава электроэрозионным диспергированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Дворник Максим Иванович. – Хабаровск, 2006. – 16 с.;
68. Исхакова Г. А. Свойства порошков карбида вольфрама, синтезированных электроискровым методом в различных углеводородах / Г.А. Исхакова В. И. Марусина // Физика и химия обработки материалов. –1993. –№5. – С. 85–93.
69. Исхакова Г. А. Структурное и фазовое состояние частиц карбида вольфрама синтезированных в электроискровом разряде / Г. А. Исхакова, В.И. Марусина // Порошковая металлургия. – 1989. – №10. – С.13–18.
70. Марусина В. И. О некоторых физико-механических свойствах карбида вольфрама кубической модификации / В. И. Марусина, Б.М.Крейчман, В. М. Филимоненко // Сверхтвердые материалы. –1981. – №6. –С.3–5.

71. Марусина В. И. Фазовый и гранулометрический состав карбидов, образующийся при электроэрозионной обработке / В. И. Марусина, Г. А. Исхакова, Х. М. Рахимбеков // Порошковая металлургия. – 1992. – № 10. – С. 61 – 64.

72. Машкина М. Н. Изменение структуры и фазового состава ВК8 при электроэрозионном диспергировании / М. Н. Машкина // Материалы и упрочняющие технологии – 2000: тезисы и материалы доклада региональной научно-технической конференции. – Курск, – 2001. – С.90–92.

73. Машкина М. Н. Изучение гранулометрических параметров порошка сплава ВК8, полученного электроэрозионным диспергированием / М. Н. Машкина // Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: матер. II межрегиональной конференции. с международным участием. – Красноярск, 1999. – С.56–57.

74. Машкина М. Н. Изучение потерь кобальта при электроэрозионном диспергировании сплавов группы ВК / М. Н. Машкина // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: региональный сборник научных трудов. – Липецк: ЛипецкГТУ, 2001. – С.143–145.

75. Машкина М. Н. Морфология и фазовый состав поверхности порошков, полученных электроэрозионным диспергированием из сплавов WC-Co / М.Н. Машкина // Сварка и родственные технологии в машиностроении: межрегиональный сборник научных трудов. – Магнитогорск: МагнитогорскГТУ, 2002. – С.126–128.

76. Машкина М. Н. Технология переработки отходов твёрдых сплавов методом электроэрозионного диспергирования / М.Н. Машкина // Эффективные технологии строительного комплекса: сборник научных трудов. – Брянск: БИГТА, 2002. – С.27–29.

77. Машкина М. Н. Химический состав порошка полученного электроэрозионным диспергированием из сплавов WC-Co / М. Н. Машкина // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: сборник научных трудов. – Курск, 2002. – С.130–133.