

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра эксплуатации и ремонта машин

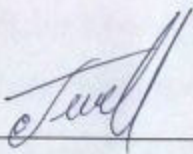
Направление подготовки – 35.04.06 «Агроинженерия»

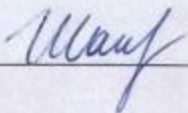
Магистерская программа – «Технический сервис в сельском хозяйстве»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

**ТЕМА: Технология упрочнения поверхностей деталей машин
из алюминиевых сплавов электроискровой обработкой при их
восстановлении**

Студент магистратуры  Галиуллин А.Р.

Научный руководитель,
к. т. н., доцент  Шайхутдинов Р.Р.

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к защите
(протокол № 20 от 08 июня 2020 г.)

Зав. кафедрой профессор  Адигамов Н.Р.
ученое звание подпись Ф.И.О.

Казань-2020

АННОТАЦИЯ

к выпускной квалификационной работе Галиуллина Айрата Рафаэлевича на тему: «Технология упрочнения поверхностей деталей машин из алюминиевых сплавов электроискровой обработкой при их восстановлении»

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки на 71 листах машинописного текста и включает введение, четыре главы, общие выводы и рекомендации и список использованных источников из 38 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель работы, исследования, апробация работы.

В главе 1 «Анализ состояния вопроса» рассмотрены различные виды восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов, их преимущества и недостатки по сравнению с обработкой методом электроискрового легирования. Приведены физические основы процесса электроискрового легирования, механизм образования поверхностного слоя, режимы, используемые при проведении процесса электроискрового легирования, основные направления развития новых технологий электроискрового легирования. Произведены выбор и постановка задач исследования.

В главе 2 «Теоретические исследования» рассмотрены физико-химические закономерности формирования покрытий на алюминиевых сплавах с помощью электроискрового легирования, видов электродов, расчет параметров электроискрового легирования.

В главе 3 «Методика экспериментальных исследований» приведены характеристики экспериментального оборудования, методики проведения экспериментов по нанесению электроискровых покрытий, методики трибологических испытаний полученных образцов, а так же анализа поверхностей.

В главе 4 «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты трибологических испытаний, определены физико- механические свойства покрытий полученных при различных режимах нанесения. Определены параметры микропрофиля в зависимости от режима обработки.

Работа заканчивается общими выводами и рекомендациями и списком использованных источников.

ABSTRACT

to the final qualifying work of Galiullin Ayrat Raphaelevich on the topic:
"Technology of strengthening the surfaces of machine parts made of aluminum alloys by
electric spark treatment during their restoration"

The final qualification work consists of an explanatory note on 71 sheets of typewritten text and includes an introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, and a list of references from 38 titles.

The introduction substantiates the relevance of the work, defines the purpose of the work, research, and testing of the work.

In Chapter 1, "analysis of the issue", various types of recovery and strengthening of aluminum alloy parts, their advantages and disadvantages in comparison with processing by the method of electric spark alloying, are considered. The physical basis of the process of electrospray doping, the mechanism of formation of the surface layer, the modes used during the process of electrospray doping, the main directions of development of new technologies of electrospray doping are given. The choice and setting of research tasks are made.

In Chapter 2, "Theoretical research", the physicochemical regularities of the formation of coatings on aluminum alloys using electrospray doping, types of electrodes, and calculation of parameters of electrospray doping are considered

Chapter 3 "methods of experimental research" describes the characteristics of experimental equipment, methods of conducting experiments on applying electric spark coatings, methods of tribological testing of the obtained samples, as well as surface analysis.

In Chapter 4, "results of experimental studies", the results of tribological tests are presented, and the physical and mechanical properties of coatings obtained under various

application modes are determined. The parameters of the micro profile are determined depending on the processing mode.

The work ends with General conclusions and recommendations and a list of sources used.

СОДЕРЖАНИЕ стр.

ВВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....	10
1.1 Применение деталей из алюминиевых сплавов в машиностроении и сельскохозяйственной технике	10
1.2. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов	12
1.3. Физические основы процесса электроискрового легирования	18
1.4. Механизм образования поверхностного слоя	24
1.5. Режимы процесса электроискрового легирования	26
1.6 Выводы и задачи исследований	28
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	31
2.1 Физико-химические закономерности формирования покрытий на алюминиевых сплавах с помощью электроискрового легирования.....	31
2.2 Электроды для электроискрового легирования в	38
2.3 К расчету параметров электроискрового легирования.	41
3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	48
3.1 Программа экспериментальных исследований	48
3.2 Методика получения покрытий и изготовления технологических образцов.....	48
3.3 Методика исследования свойств поверхности покрытий.....	52
3.4. Методика проведения трибологических испытаний образцов	55
3.5 Методика определения толщины покрытия	57
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	58
4.1 Результаты экспериментов по наращиванию поверхностей	58
4.2 Исследование микротвердости	60
4.3 Результаты исследования износостойкости	61
4.4 Исследование шероховатости	63
4.5 Результаты технико-экономической оценки предлагаемого способа восстановления с одновременным упрочнением	64
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	67

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях все больше ужесточаются требования к эксплуатационным характеристикам изделий. Упрочнение вновь изготовленных, а также восстановление изношенных деталей с одновременным увеличением ресурса, является особенно важным в условиях, когда финансовые и материальные ресурсы предприятий существенно ограничены.

Одним из методов решения проблемы повышения эксплуатационных характеристик деталей является внедрение новых материалов, обладающих низкой плотностью, но при этом удовлетворяющих, как технологическим, так и механическим требованиям. К таким материалам относятся алюминиевые сплавы. В машиностроении за последние годы применение алюминиевых сплавов увеличивается, но ужесточение условий эксплуатации современной техники и агрессивность применяемых сред не позволяют обеспечить требуемую износостойкость поверхностей.

При современной эксплуатации техники до 90% машин выходит из строя из-за предельного износа рабочих поверхностей. Основным методом повышения долговечности машин является нанесение на изношенные поверхности одного или нескольких слоев покрытия с высокими физико-механическими свойствами, которые обеспечат дальнейшую длительную работу изделий.

Большинство из существующих способов восстановления и упрочнения непригодны для восстановления изношенных деталей из алюминиевых сплавов, имеющих большие износы. Многие из них не позволяют упрочнять рабочие поверхности, что отрицательно сказывается на ресурсе деталей. Наиболее распространёнными способами восстановления деталей в настоящее время являются различные виды сварки и наплавки. Однако при наплавке или сварке к детали подводится большое количество тепла, что ведёт к их короблению и необходимости последующей доработки путём правки и последующей

механической обработки, что далеко не всегда возможно и экономически целесообразно.

В последнее время электроискровое легирование получает все большее распространение при восстановлении размеров изношенных деталей. Электроискровое легирование позволяет получать покрытия с заданными свойствами. Однако восстановление алюминиевых деталей с помощью электроискрового легирования на текущий момент изучено недостаточно. Это приводит к затруднениям при разработке типовых технологий для восстановления изношенных деталей из алюминиевых сплавов.

В литературе недостаточно освещены следующие вопросы:

- влияние режимов работы установки электроискрового легирования, материала электродов разного химического состава на перенос материала с электрода на деталь;
- возможность получения на алюминиевых поверхностях наноструктурированных покрытий и их влияние на износ;
- влияние структуры электрода на получение износостойких покрытий на алюминиевых поверхностях;
- возможность работы износостойких покрытий в паре с закаленной сталью;
- возможность получения износостойких покрытий без приращенного слоя.

В связи с этим, исследования, направленные на разработку способов восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов, являются актуальными и имеют важное хозяйственное значение.

Цель работы состояла в установлении закономерностей формирования износостойких покрытий деталей из алюминиевых сплавов с помощью электроискрового легирования и разработке технологий восстановления изношенных поверхностей.

Объектом исследования являются свойства покрытия, нанесенных методом электроискрового легирования на деталь из алюминиевых сплавов.

Задачи исследований:

1. Выявить физические закономерности формирования износостойких покрытий в зависимости от параметров электроискровой обработки поверхностей из алюминиевых сплавов.
2. Разработать методику экспериментальных формирования покрытия.
3. Исследовать формирование поверхностного слоя при процессе электроискрового легирования алюминиевых сплавов.
4. Исследовать физико-механические свойства поверхностных упрочненных слоев в зависимости от параметров электроискрового легирования.
5. Определить трибологические характеристики полученных с помощью электроискрового легирования покрытий на алюминиевых сплавах в различных условиях трения скольжения.
6. Провести технико-экономическую оценку предлагаемого метода упрочнения

Апробация работы:

Результаты работы докладывались и обсуждались на 2 международных конференциях Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса. Материалы международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса, Казань 2019, 2020

Публикации. Основные положения работы изложены в 2 печатных работах в сборниках трудов международных конференций

Структура и объем диссертационной работы. Выпускная квалификационная работа изложена на 71 страницах, содержит 11 рисунков, 4 таблицы и состоит из 4 глав, включает введение, анализ состояния вопроса, теоретические исследования, методику экспериментальных исследований, результаты экспериментальных исследований, основные выводы и рекомендации, список цитируемой литературы содержит 38 источников.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Применение деталей из алюминиевых сплавов в машиностроении и сельскохозяйственной технике

Восстановление и упрочнение изношенных деталей автомобильной, тракторной и иной техники многие годы не теряет своей актуальности, а в современных кризисных условиях, когда возникли значительные ограничения в использовании финансовых и материальных ресурсов, тема восстановления изношенных деталей приобретает особое значение. Снижение затрат на ремонт путём восстановления изношенных деталей является одним из основных путей снижения себестоимости и повышения качества ремонта техники и оборудования.

В условиях старения автомобильной и тракторной техники и снижения поставок оборудования и запасных частей из-за многократного их удорожания, возникает необходимость более эффективно использовать имеющийся парк машин и технологического оборудования, постоянно поддерживать его готовность к работе за счёт своевременного и качественного технического обслуживания и ремонта. При этом следует уделять больше внимания и средств совершенствованию технологических процессов восстановления изношенных деталей.

Известно, что большая часть техники попадает в ремонт не из-за поломок, а из-за износа рабочих поверхностей. Поэтому повышение износостойкости и долговечности деталей, является важной и актуальной задачей.

В современных машинах различных видов машиностроения все шире применяются детали из алюминиевых сплавов [1]. Только за последние 10 лет применение алюминиевых сплавов в машиностроении увеличилось более чем в 3 раза [2]. В автомобильном транспорте и сельском хозяйстве применяются десятки наименований деталей из алюминиевых сплавов: головки и блоки

цилиндров двигателей, картеры рулевых механизмов, корпуса водяных насосов и компрессоров, картеры сцепления, поршни двигателей, крышки генераторов, кронштейны, радиаторы двигателей и кондиционеров и т.д. Большая часть алюминиевых деталей изготавливается методом литья из сплавов типа алюминий - кремний (то есть из силуминов) марок АЛ2, АЛ9, ВАЛ5 и др. В меньшей степени используются сплавы типа алюминий-медь (АЛ19), алюминий - кремний - медь (АК5М2) и алюминий-магний (АЛ8). Алюминиевые сплавы, особенно силумины, отличаются хорошими литейными свойствами, коррозионной стойкостью, хорошей обрабатываемостью резанием и поэтому применяются для изготовления сложных деталей средней нагруженности. Алюминиево - магниевые сплавы обладают высокой прочностью - до 500 МПа, но подвержены коррозии, поэтому их дополнительно требуется покрывать защитными покрытиями.

Кроме литейных в машиностроении нашли применение и деформируемые алюминиевые сплавы: АК4, АК6, АК8 (поршни для двигателей), АМц и АМг(трубки для радиаторов), Д1÷Д16 (дуралюмины- поковки для деталей), подвергаемые высоким нагрузкам - несущие кронштейны, корпуса и др.

Расширяющееся применение алюминиевых сплавов обусловлено их преимуществами [4]: малым удельным весом, высокой удельной прочностью, хорошей коррозионной стойкостью, высокой тепло- и электропроводностью и т.д. Большое значение имеет способность алюминиевых сплавов к формоизменению: они хорошо лются, прокатываются, штамуются, хорошо обрабатываются резанием [5]. При этом сырьевые ресурсы для производства алюминия практически неограниченны, так как он является самым распространенным металлом в природе [9]. Поэтому можно предположить, что в будущем его применение будет только расширяться.

Расширению сферы использования алюминиевых сплавов для изготовления пар трения препятствуют невысокие эксплуатационные свойства – низкая твердость и износостойкость поверхности. Устранение этих недостатков связано с улучшением состава и качества поверхностных слоев

изделий путем применения современных методов упрочнения за счёт поверхностной обработки алюминиевых сплавов.

Надежность работы большинства машин, в том числе и сельскохозяйственного назначения, непосредственно связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства - износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление усталости и др. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная по качеству поверхность должна быть достаточно твердой, иметь мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью опорной поверхности. Для получения поверхности такого рода на деталях разного назначения, испытывающих истирающие и ударные нагрузки, разрабатываются различные процессы упрочняющей технологии, получают все большее развитие методы поверхностного легирования и модифицирования.

1.2. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов

В настоящее время разрабатываются новые способы и технологии нанесения покрытий, в том числе многослойных и многокомпонентных, на металлические поверхности [6]. Для повышения износостойкости деталей получают все большее развитие высокоэнергетические технологии нанесения покрытий, использующие высококонцентрированные источники энергии [8]. Применительно к алюминиевым сплавам -

это упрочнение поверхностей ионной имплантацией кислородом [9], электроискровым легированием [10], ионно-плазменным напылением [11], микродуговым оксидированием [12], излучением ОКГ, оксидированием в плазме тлеющего разряда [13], анодированием и т.п.

Методы поверхностного упрочнения отличаются друг от друга физико-химической природой упрочняющего воздействия, техническими показателями и эффективностью. Большое различие существует и в применении оборудования.

В силу разных причин сфера использования некоторых из указанных технологических процессов зачастую весьма ограничена, поэтому в конкретных условиях производства выбирается самый эффективный технологический процесс с точки зрения качества поверхности, экономичности, энергоемкости и т.п.

Все способы получения покрытий по признаку изменения размеров обрабатываемой детали делятся на две большие группы:

1. Упрочняющие покрытия, которые, улучшая свойства поверхности (износостойкость, твердость, коррозионную стойкость и другие свойства), практически не изменяют размер детали на месте нанесения покрытия. Процесс нанесения таких покрытий можно назвать поверхностным модифицированием. Такие покрытия необходимо наносить на вновь изготавливаемые детали. К упрочняющим способам, применяющимся для деталей из алюминиевых сплавов, относятся ионная имплантация, оксидирование в плазме тлеющего разряда, излучение ОКГ, ионно-плазменное напыление и др.

2. Упрочняющие и восстанавливающие износ покрытия, которые не только улучшают свойства поверхности, но и способствуют восстановлению исходных размеров, изношенных в процессе эксплуатации деталей. К способам, обеспечивающим получение таких покрытий, относятся: микродуговое оксидирование, электроискровое легирование, анодирование, газотермическое напыление, аргоно-дуговая наплавка.

Ионная имплантация кислородом [9] обеспечивает изменение состава, структуры и свойств тонкого поверхностного слоя алюминиевых деталей за счёт бомбардировки поверхности атомами кислорода. Упрочняемый слой получается очень тонким, около 1 мкм, к тому же требуется применение сложного технологического оборудования. Способ не даёт возможности получать

достаточно толстые износостойкие покрытия на различных

алюминиевых сплавах [9]. Оксидирование в плазме тлеющего разряда [13] даёт возможность получения плотных и однородных, безпористых плёнок окислов алюминия, которые обладают высокой твёрдостью и износостойкостью. Однако эти плёнки также получаются слишком тонкими (менее 1 мкм), не выдерживают высокие истирающие нагрузки и не обеспечивают высокую износостойкость покрытия.

По данным ЦНИТИ 85% деталей при их дефектации имеют износ не более 0,3 мм, то есть их работоспособность восстанавливается при нанесении покрытий небольшой толщины. Для повышения их долговечности необходимо на изнашивающихся поверхностях создавать упрочненные слои с высокими физико-механическими свойствами. При этом, для наружных поверхностей технологические методы разработаны более полно, чем для внутренних, которые отличаются недостаточной доступностью для инструмента. Это хорошо видно на примере восстановления посадочных мест под подшипники в корпусных деталях, крышках, подшипниковых щитах, изготовленных из алюминиевых сплавов. В большинстве случаев ремонт заключается в запрессовке специально изготовленных втулок с последующей расточкой под посадочный размер. Технология включает несколько высокоточных операций и отличается высокой трудоёмкостью. Другими методами, применяемыми для ремонта деталей из алюминиевых сплавов, являются разного рода наплавки. Наиболее распространён метод аргонно-дуговой наплавки с последующей расточкой отверстия под нужный размер. Так как алюминиевые сплавы обладают высокой теплопроводностью, то для наплавки требуется большой теплоподвод, который нередко приводит к короблению детали и необходимости последующего исправления механической обработкой. К тому же посадочные места небольших диаметров (20÷40мм) наплавкой исправить невозможно из-за ограниченного доступа.

При анодировании алюминиевых сплавов можно получить достаточно толстые (до 1мм) покрытия из окислов алюминия, обладающие высокой

износостойкостью и коррозионно - защитными свойствами. Однако сложность технологии и нестабильные результаты ограничивают возможности метода.

Из перечисленных выше способов для получения износостойких покрытий на алюминиевых сплавах более подходящими процессами являются микродуговое оксидирование (МДО) [12] и электроискровое легирование [10,14]. Оба способа относятся к высококонцентрированным потокам энергии на поверхность детали, что приводит к значительному повышению износостойкости деталей [14,12].

Сущность метода МДО [12] заключается в формировании на поверхности детали в условиях воздействия микродуговых разрядов износостойкого покрытия, состоящего преимущественно из корунда. По свойствам МДО покрытия значительно превосходят покрытия, получаемые обычным анодированием: по микротвёрдости в 3 раза, по износостойкости - почти в десять раз [12]. МДО покрытия на алюминиевых сплавах имеют твёрдость в 4,5 раза большую, чем твёрдость закалённой стали, а износостойкость при работе в паре со сталью находится на уровне твёрдых сплавов.

Основными преимуществами метода МДО алюминиевых сплавов являются [12]:

- возможность формирования покрытий на детали, имеющие сложную конфигурацию, в том числе внутренние полости;
- получение твёрдых износостойких покрытий толщиной от 0,1 до 1мм в зависимости от марки сплава, состава электролита и режима обработки;
- устойчивый, легко воспроизводимый процесс;
- простое и компактное оборудование, позволяющее полностью механизировать процесс.

Однако метод МДО применяется в промышленности с ограничениями, так как находится в стадии становления и многие вопросы теории и технологии требуют дальнейшего изучения. Как и любая другая, технология МДО имеет и недостатки [12]:

- высокая энергоёмкость технологического процесса (плотность тока $j=20-100 \text{ A/дм}^2$, напряжение до $V=500 \text{ В}$);
- необходимость соблюдать повышенные меры безопасности при работе с высоким напряжением;
- возможность отслаивания покрытия при работе деталей во влажной среде;
- необходимость формирования дополнительных гальванических покрытий (например, медных) для защиты от анодирования части детали;
- необходимость удалять с помощью механической обработки верхний, технологический слой, обладающий низкой твёрдостью и прочностью.

Сущность процесса электроискрового легирования [10,14,35] заключается в явлении электрической эрозии и полярном переносе материала анода (обрабатывающего электрода) на катод (электрод-деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде. Метод был разработан Б.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко, которые предложили физическую модель процесса, изучили возможности и технологические особенности метода, создали опытные и промышленные образцы установок [10,15,20].

В настоящее время из всех перечисленных методов поверхностного упрочнения по ряду параметров самым эффективным является электроискровое легирование [10], которое позволяет получать на поверхности алюминиевых деталей покрытия из различных материалов довольно простым способом, как в технологическом отношении, так и в аппаратном оформлении, что является его большим преимуществом. Другими существенными преимуществами электроискрового легирования являются: высокая адгезия покрытия с основой, возможность локальной обработки поверхности, отсутствие необходимости в предварительной подготовке поверхности и экологичность процесса. Высокая адгезия покрытия, полученного методом электроискрового легирования, к подложке объясняется тем, что электроискровое

легирование – процесс диффузионный, т.е. атомы покрытия диффундируют в подложку и отрыв покрытия от подложки практически невозможен.

Однако способ электроискрового легирования, как и другие способы упрочнения, имеет недостатки, которые ограничивают область его применения:

- высокая шероховатость поверхности ($Ra \approx 20 \mu\text{м}$);
- малая толщина получаемого покрытия ($t \leq 0,2 \text{ мм}$).

Шероховатость покрытия можно снизить механической обработкой шлифованием, полировкой, раскаткой, алмазным выглаживанием и т.д

В последнее время увеличивается количество исследований, посвященных получению на стальных поверхностях при помощи электроискрового легирования нанопокровтий или наноструктурированию их поверхностей [17], что позволяет значительно улучшить физико - механические свойства поверхности стальных деталей. Появление наноструктур и нанокристаллов в поверхностном слое покрытия на стали позволяет увеличить износостойкость стальных деталей на порядок. В связи с этим можно предположить, что формирование покрытий с участием наночастиц на алюминиевые детали приведет к значительному повышению их износостойкости.

В гораздо меньшей степени исследован процесс получения нанопокровтий и наноструктурирования поверхности алюминиевых сплавов, в частности, алюминивно-медных сплавов типа дуралюминов, которые широко применяются в промышленности [14,15]. В основном ведутся исследования свойств поверхностных слоев алюминиевых сплавов при введении в них нанопорошков способом электроискрового легирования - кремниевых сплавов (АК12, АК9) с применением в электродах ультрадисперсных порошков получены положительные результаты: твёрдость поверхности увеличилась в два раза, а её износостойкость - в три раза [24]. Однако при этом следует учитывать значительное удорожание технологии, так как сам процесс получения ультрадисперсных порошков из тугоплавких соединений является весьма трудоёмким и дорогостоящим.

Вопрос получения износостойкого покрытия на алюминиевых сплавах при помощи электроискрового легирования является исключительно важным, так как позволяет открыть новые возможности для применения этих сплавов в узлах трения с использованием покрытия полученного методом электроискрового легирования и расширить сферу их применения в машиностроении.

1.3. Физические основы процесса электроискрового легирования

Электроискровое легирование металлических поверхностей основано на явлении электрической эрозии и переноса материала анода (инструмента) на катод (деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде [10,31]. При электроискровом легировании эродированный материал электрода - анода переносится на электрод-катод, а материал катода - на анод, причём, как установлено многочисленными экспериментами, преимущественному разрушению и переносу подвергается материал анода. Важным элементом электроискровой обработки материалов в газовой среде является умение управлять процессом обработки и прогнозировать свойства покрытия: толщину, микро- и макроструктуру, физико-механические свойства (износостойкость, коррозионную стойкость, сопротивление усталости и т.д.) [7,15]. На данном этапе накоплен большой экспериментальный опыт по получению с помощью электроискрового легирования покрытий разного типа. Однако до сих пор обобщающей теории электроискрового легирования, позволяющей прогнозировать свойства покрытий, не создано [10,14]. Это связано с тем, что математическое описание процесса является исключительно сложным из-за наличия большого количества параметров, действующих разнонаправленно. К таким параметрам относятся материалы катода и анода, состав газовой среды, частота, скважность и амплитуда токов искрового разряда, амплитуда и частота вибрации электрода, появление вторичных фаз на катоде и аноде, величина межэлектродного промежутка и т.д.

Формированию структуры и свойств поверхностей, полученных с помощью электроискрового легирования, посвящены исследования Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [7,14,15], Б.Н.Золотых [21], А.Е. Гиглевича и В.В Михайлова [16,], Л.С. Палатника, А.Д. Верхотурова [22-24], Г.П. Иванова [17], Е.А. Левашова и др.[19], Ф.Х.Бурумкулова [26,27] Е.В. Юрченко [36-37] и других.

Активно этим вопросом занимаются на кафедре «Эксплуатация и ремонт машин» Казанского ГАУ Адигамов Н.Р., Шайхутдинов Р.Р. и Ахметзянов Р.Р.

В связи с отсутствием единой обобщающей теории электроискрового легирования на текущий момент целесообразно рассмотреть существующие физические модели процесса, позволяющие в каждом конкретном случае прогнозировать свойства получаемых покрытий на разных деталях. В настоящее время существуют несколько физических моделей процесса электроискрового легирования: модель Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, модель А.Д. Верхотурова, электротермическая модель Б. И. Золотых, модель быстрозатухающей термоупругой волны В. И. Раховского и Л. М. Ягудаева и др.

Авторы метода электроискровой обработки Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко [7] определили электрическую эрозию как физическое явление, заключающееся в направленном выбросе материала электродов под воздействием электрического разряда, протекающего между ними. Наиболее полно физическая модель процесса электроискрового легирования была изложена в работе основоположников метода Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко [7].

Сущность модели заключается в том, что при сближении электродов напряженность электрического поля между ними увеличивается. При достижении определенной величины напряженности поля происходит пробой промежутка между электродами, в результате чего появляется канал сквозной проводимости. Через возникающий канал, поток электронов устремляется к аноду, а поток ионов движется к катоду. Поток электронов фокусировано ударяется о твердую металлическую поверхность анода, в результате чего происходит их торможение с выделением большого количества тепла. От анода, в результате мгновенного разогрева, отделяется капля расплавленного металла и движется к катоду,

опережая анод. Так как энергия от источника питания подводится к разрядному промежутку в виде импульса, плотность тока значительно превосходит критические значения. Летящая от анода капля нагревается до высокой температуры, закипает и взрывается. В результате этого частицы летят к катоду широким фронтом. Достигнув катода, расплавленные частицы анода свариваются с ним и частично внедряются в его поверхность. Частицы во время полета к катоду находятся в соприкосновении с окружающим канал газом и, взаимодействуя с ним, могут образовывать оксиды, нитриды и т.д. Поэтому их химический состав может существенно отличаться от состава анода. По образовавшемуся скоплению частиц на катоде ударяет движущийся вслед за электронами анод, проковывая полученное покрытие. В результате удара увеличивается плотность и однородность покрытия. При контакте электродов проходит следующий импульс тока, вызывая прогрев поверхностного слоя катода и сваривание частиц между собой. При этом прогреве поверхностного слоя происходит диффузия частиц анода в глубину поверхностного слоя катода. Как следствие, между частицами анода и материалом катода возможны химические реакции, также изменяющие состав покрытия. В следующей фазе анод поднимается вверх и цикл повторяется. На поверхности катода остается покрытие, прочно соединенное с ним за счет диффузии. При движении анода на катоде образуется совокупность гребней и впадин, которая определяет шероховатость и сплошность обработанной методом электронно-лучевого легирования поверхности.

Особенностью данной, сугубо качественной модели является утверждение о том, что частицы переносятся только в жидко-капельной фазе, что расходится с мнением других исследователей процесса электронно-лучевого легирования [24].

Модель А.Д. Верхотурова [24]. отличается от модели Лазаренко Б.Р. и Лазаренко Н.И. учетом явлений, происходящих в поверхностных слоях анода и катода:

- перенос материала катода на анод происходит не только в жидкой, но так же в паровой и твердой фазах;

- наличие в местах сфокусированного действия электроискровых импульсов трех зон: зона испарения, зона плавления и зона напряженного состояния;
- «схватывание» материалов катода и анода при их контакте;
- образование на катоде микроанодов, в которых происходит физико-химическое взаимодействие частиц анода и катода, приводящее к изменению их химического состава;
- ограничение толщины легированного слоя.

До последнего времени не существовало единого мнения относительно агрегатного состояния продуктов эрозии материала анода, переносимых на катод. Предполагались: перенос в жидкой фазе, в жидкой и газовой фазе одновременно [7,8,15,17]. Но кроме того исследования показывают, что перенос может происходить в твердой фазе в результате хрупкого разрушения материалов электродов [8]. В некоторых случаях экспериментально наблюдалась зависимость эрозионной стойкости от физико-химических свойств материала [10,15,19,20,24] (температуры плавления, кипения, теплоты сублимации), а также сил межатомной связи (модуль упругости). Предпринимались неоднократные попытки установить связь эрозии с одним из указанных свойств [7,10,15], либо с их комплексом. Такая связь предполагает определение критериев эрозионной стойкости (критерии Палатника, Золотых и т.д.) и соответствующие этим критериям ряды металлов. Расположение металлов по этому принципу игнорирует влияние структурных факторов на эрозию и позволяет непосредственно связать эрозионную стойкость материалов с особенностями их электронного строения, что корректно лишь в случае эродирования вещества в газовой и жидкой фазах.

На практике, в качестве материала легирующего электрода применяют материалы с высокой твердостью и износостойкостью. Однако эти же свойства обеспечивают и высокую эрозионную стойкость, что значительно уменьшает производительность процесса. Поэтому одной из задач разработки электродных материалов является создание прочных, твердых, износостойких материалов, в то же время обладающих высокой эрозионной способностью.

В процессе электроискрового легирования поверхность электрода подвергается локальному действию высоких давлений и температур: давление ударной волны составляет $(2,7)$ Па, температура нагрева поверхностных микрообъемов достигает $(5,7)$ К, т. е. значительно превосходит температуру кипения электродных материалов. При этом высокая скорость теплоотвода приводит к тому, что в пределах небольшой толщины слоя (порядка нескольких или десятков микрометров) температура быстро падает до температур плавления и соответствующих фазовых превращений материалов. В результате этого в легированном слое интенсифицируются микрометаллургические процессы (диффузия, химическое взаимодействие), возникают также и фазовые превращения, что приводит к образованию крайне неравновесных структур с очень мелким зерном, высокой гетерогенностью по составу, структуре и свойствам.

Многократное действие искровых разрядов приводит к прекращению роста толщины легируемого слоя. Основными причинами, вызывающими остановку роста толщины являются:

- накопление внутренних напряжений, в том числе за счет образования в покрытии новых фаз с различным коэффициентом термического расширения;
- увеличение термоусталости покрытия как результат многократных циклов нагрева и охлаждения его микрообъемов;
- образование ультрадисперсной структуры.

Электротермическая модель электрической эрозии металлов была разработана Б. И. Золотых [21]. В начальной стадии развития этой модели

электрическая эрозия обуславливалась действием электромагнитных сил механического характера [21]. Особенностью этой модели является передача энергии электродам с помощью факела импульсного разряда [21]. Передача энергии электродам осуществляется: 1) электронной и ионной бомбардировкой анода и катода соответственно; 2) термической бомбардировкой электродов частицами газа, составляющего канал разряда; 3) излучением столба разряда;

- 4) торможением частиц, возникающих на противоположных электродах.

Энергия, передаваемая факелом, может обуславливать до 70% всей эрозии за импульс [21]. Разряд осуществляется через многие тонкие каналы, мигрирующие по поверхности электродов. Процесс эрозии рассматривается как результат многократных взаимодействий взрывного характера, обусловленных перемещением канала по поверхности электродов и перегревом металла большими плотностями тока.

Общим у электродинамической и электротермической моделей является то, что основной причиной передачи энергии электродам является бомбардировка их электронами и ионами, обладающими большой кинетической энергией.

Наряду с изложенными представлениями существует предположение [27], что причиной выброса вещества в межэлектродное пространство является быстрос затухающая упругая волна, возникающая при действии импульсного разряда на электрод. Частицы отрываются от электродов за счет термоупругих напряжений.

Каждая из этих моделей оказывается пригодной для описания какого-то конкретного вида электроискрового легирования. В зависимости от электрических режимов, а также теплофизических и механических свойств электродов, основное влияние на механизм переноса материала оказывают электромеханические, электродинамические, электротермические силы, или их сочетание.

1.4. Механизм образования поверхностного слоя

При электронискровом легировании под воздействием импульсных разрядов на обрабатываемой поверхности образуется измененный поверхностный слой. Качественные и количественные характеристики полученного слоя зависят от многих факторов: природы и материала электрода, характеристик импульсного разряда, длительности обработки, газовой среды межэлектродного промежутка и т.д.

Механизм образования поверхностного слоя происходит следующим образом. При единичном разряде на поверхности катода образуется лунка, с приподнятыми над поверхностью краями в результате выброса электронов при воздействии на катод импульсов электрического тока [10,16]. Размеры лунок зависят от эрозионной устойчивости материалов электродов и энергии электрического импульса. При многократном действии импульсов в одну точку на катоде образуется вместо слоя переносимого материала сильно увеличенная в размерах лунка, что приводит к необходимости постоянного перемещения легирующего электрода (анода) вдоль обрабатываемой поверхности.

Если скорость перемещения электрода такова, что к моменту следующего импульса электрод успеет сместиться на диаметр лунки, то поверхность катода после однократного прохода электрода будет иметь зубчатый профиль, в котором зубцы образованы краями соседних лунок. При смещении точки приложения последующего импульса на величину меньшую, чем диаметр лунки, разряд будет протекать через наиболее выступающую часть поверхности, т. е. край лунки, образованной предыдущим разрядом. При этом часть металла с края лунки переместится к ее центру. Таким образом, на катоде одновременно с образованием легированного слоя будет происходить перемещение расплавленных и размягченных зон материала электродов. Установлено [15], что если контактирующая площадь анода больше площади образующейся лунки, то наиболее качественный слой получается при смещении

электрода на $1/4$ диаметра лунки. Изучение единичных следов разрядов в среде воздуха, оставляемых отдельными каналами искры на поверхности монокристаллов, показывает, что в одну полуволну тока разряд оставляет много единичных следов на поверхности металла. При этом наблюдается один и тот же характер изменения поверхности анода - оплавление и пластическая деформация оплавленной и примыкающей к ней зоны. Оплавленная единичная лунка на аноде имеет форму правильной окружности и практически не зависит от кристаллографической ориентировки зерен металла. Зона пластической деформации распространяется за пределы участка, пораженного разрядом, и выглядит так, как если бы деформация производилась сосредоточенной механической нагрузкой.

Для всех исследованных металлов при всех режимах обработки на катоде получаются резко ограниченные лунки, являющиеся результатом механического разрушения поверхности. Форма лунок зависит от кристаллографической ориентации исследуемой грани зерна металла. Различный характер лунок на аноде и катоде объясняется тем, что на аноде область, пораженная отдельным каналом искры, значительно больше, чем на катоде. Поэтому на аноде импульсное давление спадает значительно медленнее по времени, чем на катоде, и плавление превалирует над эффектом «откола».

Для получения качественных толстослойных покрытий необходимо обеспечить эрозию материала анода преимущественно в капельно - жидкой фазе [29.] (правомерность этого утверждения может быть подвергнута сомнению),

и по возможности уменьшить содержание в продуктах эрозии парогазовой фазы, которая способствует распылению капельно - жидкой фазы в межэлектродное пространство.

Действие искрового разряда на поверхность стальных деталей приводит к существенному изменению субструктуры их поверхности и напряженного состояния в зоне действия искрового разряда]. При действии единичного искрового разряда на поверхности металла в области эрозионного кратера возникают три зоны [24]: зона плавления материала (глубина ~ 100 мкм), в

которой фиксируются искажения кристаллической решетки, а также наличие мелких зерен; зона наибольшего упрочнения с локальным повышением твердости более чем на 400 МПа (глубина $\sim 120 \div 150$ мкм), в которой наблюдаются участки с почти однородным распределением дислокаций высокой плотности ($1/$; зона, в которой твердость повышается на величину от 50 до 400 МПа (глубина $\sim 150 \div 200$ мкм).

1.5. Режимы процесса электронно-искрового легирования

Для осуществления электронно-искрового легирования применяются схемы с накоплением энергии в конденсаторах и разрядом за счет контакта электрода с поверхностью детали.

Все процессы, обуславливающие электронно-искровую обработку, протекают в режиме короткого замыкания в газовом межэлектродном промежутке толщиной от 1 до 15 мкм, причем захватывают лишь поверхностные слои электрода (анода) и детали (катода). При искровом разряде в газовом промежутке возникает встречное движение электронов и положительных ионов, что создает электрический ток, величина которого определяется разностью положительных и отрицательных зарядов.

Существует два механизма организации разряда накопительных конденсаторов [10,16]:

- начало разряда накопительных конденсаторов происходит в режиме короткого замыкания;
- разряд происходит при отходе электрода от поверхности детали.

Модель процесса электронно-искровой обработки с контактным началом работы в газовой среде заключается в том, что вибрирующий электрод приближается к поверхности детали, микрорельеф которой состоит из большого количества неровностей. При соприкосновении вершин неровностей детали и электрода происходит разряд конденсаторов с образованием плазменного канала сквозной проводимости, через который осуществляется

импульсный разряд энергии накопительного конденсатора. После разряда происходит отход электрода под воздействием газодинамических сил, возникающих от взрывного оплавления мостиков связи. После отхода электрода происходит заряд конденсатора и процесс повторяется.

Разрушение и перенос материала электрода на поверхность детали разделяется на две стадии:

- мостиковая стадия – наплавка в режиме короткого замыкания;
- работа с плазменным промежутком.

В случае, когда длительность импульса тока больше, чем время разогрева материала до оплавления, возможна электроискровая наплавка в режиме короткого замыкания. При этом режиме характерна грубая текстура поверхности с большими параметрами шероховатости, т.к. перенос расплавленного материала происходит порциями. Порции получаются в результате образования расплавленных мостиков между электродом и деталью при отходе электрода. Так как скорость охлаждения части мостика, прилегающей к детали, выше, чем части, прилегающей к электроду, то при отходе электрода большая часть мостика остается на детали, образуя покрытие.

Режим работы с плазменным промежутком отличается тем, что короткое замыкание между электродами не образуется, так как электрод под воздействием газодинамических сил, возникающих от взрывного оплавления мостиков связи, отбрасывается от детали. В результате этого образуется зазор, наполненный плазмой. В этом режиме основная масса эродированного материала выделяется в жидкой и жидко-паровой фазах. При образовании плазмы из-за её низкого сопротивления происходит развитие искрового разряда, что ведет к росту эрозии электрода и переносу материала на поверхность детали.

Отличие режима мостиковой стадии от режима с плазменным промежутком заключается в том, что в первом случае количество электричества, пропускаемое в режиме короткого замыкания, составляет не более 10% , а во втором случае – около 100% от общего заряда конденсаторов.

Воздействие электрической искры на анод в основном состоит из плавления и испарения металла, а на катод – как микровзрыв, сопровождаемый механическими повреждениями в виде лунки с приподнятыми над поверхностью краями. Так как все металлы по эрозионной устойчивости располагаются в определенный ряд [10,16], (начиная с олова и кончая вольфрамом), то модель процесса переноса материала с анода на катод для каждого металла будет различна.

Когда на алюминий наносятся материалы с небольшой эрозионной устойчивостью (олово, цинк), то количество металла, выбрасываемое единичным импульсом с анода велико, а с катода – ничтожно настолько, что им можно пренебречь. Если электроэрозионная устойчивость материала катода выше, чем у материала анода, то на поверхности образуется покрытие, а если ниже, то на поверхности катода образуются лунки и покрытие не образуется, так как количество материала, осаждающееся на катоде меньше порции материала, выброшенной с поверхности катода.

В результате электроискрового легирования изменяются размеры, рельеф (шероховатость), а также физические, химические и механические свойства поверхностного слоя обрабатываемой детали, что позволяет получать рабочие поверхности с нужными эксплуатационными характеристиками. Для упрочнения и повышения износостойкости поверхности деталей желательно получать их с минимальной шероховатостью ($Ra \approx 10 \mu\text{м}$) и достаточной толщины ($t \sim 0,5 \text{ мм}$). При обычных режимах электроискрового легирования на алюминиевых деталях достижение таких параметров весьма затруднительно, поэтому следует рассмотреть новые технологии электроискрового легирования [28,29,36,37,38.], появившиеся в последнее время.

1.6 Выводы и задачи исследований

Результаты проведенного обзора литературы показывают, что применение электроискрового легирования для обработки деталей из

алюминиевых сплавов сопряжено с рядом трудностей, вследствие чего необходима разработка специальных методов для осуществления этого процесса. В последнее время разработан ряд новых методов электроискрового легирования с использованием специальных обрабатывающих электродов. Одним из вариантов является введение в инструмент наночастиц, что обеспечивает улучшение физико-механических свойств получаемых покрытий. Перспективным методом дальнейшего развития

процесса является разработка условий, при которых наноструктурированные покрытия образуются собственно в результате процесса.

Предварительные исследования показали, что подобная реализация технологий электроискрового легирования при обработке алюминиевых сплавов возможна с применением в качестве обрабатывающего электрода тугоплавкого металла в виде матрицы с включением в него легкоплавкого компонента, например олова.

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является установление закономерностей формирования износостойких покрытий деталей из алюминиевых сплавов для восстановления изношенных поверхностей с помощью электроискрового легирования электродами разного химического состава.

Задачи исследований:

1. Выявить физические закономерности формирования износостойких покрытий в зависимости от параметров электроискровой обработки поверхностей из алюминиевых сплавов.
2. Разработать методику экспериментального формирования покрытия.
3. Исследовать формирование поверхностного слоя при ручном процессе электроискрового легирования алюминиевых сплавов.
4. Исследовать физико-механические свойства поверхностных упрочненных слоев в зависимости от параметров электроискрового легирования.

5. Определить трибологические характеристики полученных с помощью электронского легирования покрытий на алюминиевых сплавах в различных условиях трения скольжения.

6. Провести технико-экономическую оценку предлагаемого метода упрочнения

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Физико-химические закономерности формирования покрытий на алюминиевых сплавах с помощью электроискрового легирования

Получение износостойких покрытий на алюминии и его сплавах представляет большой научный и практический интерес в связи с расширяющимся его применением во всех отраслях машиностроения от авиации до сельского хозяйства. Поэтому изучение процессов получения износостойких и долговечных покрытий на поверхности алюминиевых сплавов, структуры и свойств получаемых покрытий является весьма актуальным. Это позволит выявить закономерности получения износостойких покрытий на алюминиевых сплавах и разработать программу по управлению процессом электроискрового легирования с целью повышения качества этих покрытий.

Алюминиевые сплавы характеризуются следующими параметрами [4]:

- низкой температурой плавления (660°C) и очень высокой температурой испарения (2500°C);
- низкой плотностью -2700 кг/м^3 ;
- высоким коэффициентом линейного расширения $22 \times 10^{-6} \text{ 1/град}$ превышающим коэффициент линейного расширения стали в 2 раза;
- отсутствием аллотропических видоизменений структуры;
- наличием на поверхности алюминиевых сплавов плотной окисной плёнки, обладающей высоким электросопротивлением.

Эти параметры могут оказать значительное влияние на свойства покрытий, получаемых с помощью электроискрового легирования на алюминиевых сплавах, поэтому необходимо рассмотреть возможность корректировки технологии электроискрового легирования с учётом этих особенностей.

Кроме полярного эффекта, связанного со свойствами материалов электродов и параметрами импульсного разряда, на получение покрытия влияют:

- свойства газовой среды, в которой протекают процессы электроискрового легирования;
- величина межэлектродного промежутка;
- изменение свойств поверхности электродов в процессе электроискрового легирования и т.д.

Из-за большого числа факторов, влияющих на процесс электроискрового легирования, общая критериальная модель процесса электроискрового легирования ещё не разработана и поэтому режимы получения покрытий с заданными свойствами требуется уточнять экспериментально.

Для получения покрытий на алюминиевых сплавах с высокой износостойкостью можно использовать два направления:

- получение локальных толстостенных покрытий, содержащих наноструктуры из упрочняющих элементов с увеличением размера обрабатываемых деталей;
- получение покрытий за счёт модифицирования (наноструктурирования) поверхности упрочняющими элементами, имеющими нанометровый размер без изменения размера детали.

Первое направление может быть применено для восстановления и упрочнения изношенных деталей из алюминиевых сплавов, например, восстановление посадочных мест под подшипники в корпусных деталях из алюминиевых сплавов.

Получению толстослойного покрытия на алюминиевых сплавах с помощью электроискрового легирования, препятствует разрушение покрытия при его многослойном нанесении. Как показывает практика, электроискрового легирования, достижение максимальной толщины покрытия (~0,5 мм и более) зависит от многих причин: энергии импульса, состава окружающей среды, химического состава и физических свойств обоих электродов и т.д. Известно [15], что увеличение энергии импульса приводит к получению покрытия большей

толщины, но одновременно раньше достигается максимум переноса материала и наступает его разрушение.

В результате многочисленных экспериментов разработана [15,22] физическая модель ограничения толщины формируемого слоя покрытия при электронском легировании. Рост слоя сопровождается накоплением в нем остаточных напряжений и изменением физико-химических и механических свойств обрабатываемой поверхности. При электронском легировании в период прохождения импульса тока возникает тепловая волна, создающая импульсные термические напряжения, которые постепенно нарастают по мере изменения свойств поверхности катода. При прохождении через слой металла импульсных термических напряжений в местах их активного действия остаются остаточные напряжения. В момент времени, когда суммарная величина остаточных и термических напряжений превысит предел прочности наносимого слоя, начинается его разрушение. При этом сначала уменьшается рост слоя (процесс электронского легирования как бы стабилизируется), а затем рост прекращается совсем и далее начинается его разрушение, то есть унос материала с поверхности катода превышает количество осажденного на нем материала с анода.

Согласно этой модели, учитывая высокую теплопроводность алюминиевого сплава, можно предположить, что в результате воздействия импульсных разрядов пики тепловых волн будут значительно снижены, а, следовательно, уменьшатся термические напряжения в поверхностном слое. Это даст возможность получать на алюминиевых сплавах более толстые слои покрытия по сравнению со сталью. К этому же ведет высокая пластичность алюминиевого сплава, которая должна снизить развивающиеся термические напряжения и отодвинуть порог насыщения в сторону увеличения толщины получаемого слоя покрытия.

С другой стороны, исходя из той же модели процесса электронского легирования, для снижения внутренних напряжений в процессе обработки, необходимо уменьшить тепловое воздействие на поверхность обрабатываемого изделия, т.е. уменьшить величину тепловых волн,

возникающих в процессе электроискрового легирования на поверхности покрытия и в его толщине. Этого можно добиться снижением энергии искрового разряда за счёт уменьшения длительности воздействия и увеличения пауз между ними (при сохранении амплитуды искрового разряда), а для повышения производительности электроискрового легирования можно

использовать высокую частоту импульсов $400 \div 1000 \text{ Гц}$.

Подтверждением сказанному выше может служить работа [29], в которой получен слой покрытия около 1 мм (бронза АЖ9-4 на сталь). В результате проведения работы установлено, что для получения толстослойных покрытий с помощью электроискрового легирования необходимо соблюдать три условия:

- поддержание на электроде – аноде температурного режима в пределах $20 \pm 10\%$ от температуры плавления анода;
- использование режима «заторможенного электрода», то есть не двигать электродом до получения покрытия необходимой толщины;
- использование режима, когда перенос материала анода на катод производится не в паровой, а в капельной-жидкой фазе.

Использование режима переноса материала анода в капельной фазе и тем более, режима заторможенного электрода неизбежно приводят (как показали наши исследования) к получению бугристого покрытия. Поэтому для получения толстостенного покрытия на алюминиевых сплавах с низкой шероховатостью и без последующей механической обработки (например, раскатки) необходимо подбирать режимы электроискрового легирования экспериментально с учётом сказанного выше.

В работе об особенностях электроискрового легирования алюминия и его сплавов [28] приводятся данные, которые показывают, что использование электродов из Al (а также других металлов Cu, Ni, Ti, Cr и др.) не дают привеса на катоде, так как происходит значительное распыление материала катода в межэлектродное пространство, преобладающее над осаждением материала с анода. В то же время есть свидетельства того, что алюминий в условиях электроискрового легирования может быть нанесен на сталь [17]

Исследования по электроискровому легированию на сплавах Д16Т, АК 4 и других электродами из разных элементов показали, что на алюминиевых сплавах можно получать покрытия из легкоплавких элементов Sn, Zn, Pb с температурой плавления $T_{пл} < T_{пл}$ алюминия. Легирование же элементами с $T_{пл} > T_{пл}$ алюминия приводит только к эрозии катода, т.е. уменьшению его массы. В тоже время при электроискровом легировании алюминиевых сплавов тугоплавкими анодами, несмотря на износ материала катода, часть материала анода иногда достигает катода и оседает на его поверхности, образуя интерметаллиды [36]. При многократном действии разряда на поверхности алюминиевых сплавов получается сплошная упрочненная зона, расположенная ниже базовой поверхности на 50-100мкм. То есть, происходит по существу модифицирование поверхности алюминиевого сплава. При подаче в межэлектродный промежуток дисперсных материалов в виде порошка из тугоплавких материалов, картина получения покрытия на алюминиевой поверхности значительно меняется: получают покрытия над базовой поверхностью подложки, что объясняется перераспределением энергии импульсов в межэлектродном промежутке в пользу дисперсных частиц, которые быстрее расплавляются и переносятся на катод.

При электроискровом легировании алюминиевого сплава в обычной атмосфере чистым Zn [37], практически не происходит окисления цинка. Покрытие состоит из чистого цинка и всего лишь 3% вкраплений окиси цинка. Отсутствие окисления цинка можно объяснить кратковременностью процесса электроискрового легирования: время процесса составляет 10...5с., а также высокой химической стойкостью цинка. Так как алюминий по эрозионной стойкости стоит в ряду дальше цинка (после Ni, Ti, Cr), то можно предположить, что при электроискровом легировании композиционными электродами (матрица-алюминий, включения - микро- или наночастицы упрочняющей фазы) алюминиевые частицы также будут плохо окисляться и меньше будут влиять на износостойкость покрытия, чем частицы упрочняющей фазы.

Исследование влияние энергии разряда [28] на распределение элементов Ti, Ni и Cr в покрытии при электронском легировании алюминия и сплавов на его основе (Д16Т, АЛ25) электродами из указанных элементов показало, что Cr

и Ti распределяются в поверхностных слоях покрытия неравномерно. С увеличением энергии разряда усиливается диффузия элементов из покрытия в подложку, и увеличивается их концентрация в подложке. При этом зависимость коэффициента массопереноса от энергии разряда носит линейный характер в отличие от стальных образцов, покрытие на которых обычно имеет максимум. По результатам работы можно сделать вывод, что на алюминий и его сплавы (Д16Т) можно наносить не только легкоплавкие, но и тугоплавкие элементы типа Ti, Ni, Cr и получать соответствующие покрытия.

При электронском легировании Sn и Pb одноименными электродами на образцах покрытия как такового не образуется [36], так как вес катода постоянно уменьшается. О каком либо модифицировании поверхности не сообщается. В результате эксперимента сделан вывод, что при электронском легировании одноименными электродами с низкими температурами плавления, низкой тепло- и электропроводностью значительного выплеска жидкой фазы с анода не происходит, хотя вязкость и коэффициент поверхностного натяжения расплавленного металла играют существенную роль. Для получения покрытия некоторой толщины на катоде необходимо иметь анод с низким коэффициентом тепло- и электропроводности, а катод - наоборот, с высоким. В этом случае жидкая фаза с анода будет оседать на катоде, а не выбрасываться в межэлектродное пространство. Увеличению жидкой фазы на аноде способствует его перегрев относительно катода. Это обычно получается автоматически, т.к. диаметр электрода – анода обычно $(2 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м, а катод представляет собой пластину или деталь, прижатую к опоре, и, следовательно, хорошо охлаждаемую за счёт быстрого отвода тепла.

При получении локальных толстослойных покрытий $(0,5 \cdot 10^{-3}$ м и более) необходимо [37], чтобы процессы на электродах носили резко асимметричный характер, т.е. нужно обеспечить различную температуру электродов. Если будет

обеспечено сваривание частицы, вылетевшей с анода, с катодом, то процесс формирования покрытия будет происходить более интенсивно.

Ещё одним способом получения толстослойных покрытий является применение вращающихся электродов.

При вращении анода перенос материала идет равномерно и непрерывно, то есть в этом случае получается линейная зависимость привеса катода от времени обработки, поэтому «толщина покрытия может быть практически неограниченной» [38]. После достижения слоя величиной $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м. покрытие становится бугристым. Авторы связывают появление бугров с неравномерным движением электрода относительно обрабатываемой поверхности. Однако бугры появляются и при механизированном формировании покрытия, где равномерность хода электрода анода по обрабатываемой поверхности гарантирована.

Образование бугров связано с особенностями структуры, наличием на поверхности различных фаз и частиц, обладающих разной энергией, которые по-разному воспринимают диффузию атомов, попадающих на катод с анода, что и вызывает их неравномерное осаждение. Особенно это заметно при использовании импульсов с высокой энергией, когда формируются бугры, вначале небольшие, но возвышающиеся над общим уровнем поверхности. С увеличением продолжительности электронского легирования на этих буграх преимущественно локализуются разряды, вызывая их рост. Следует отметить, что до настоящего времени ещё не найден надёжный способ заполнения пустот между буграми материалом анода для получения покрытия с низкой шероховатостью. Очевидно, что процесс появления бугров до конца не выяснен и требует соответствующего исследования.

Некоторому снижению бугристости покрытия служит метод, сущность которого заключается в смене полярности электродов [10]. При получении грубой поверхности покрытия меняют полярность электродов и повторяют обработку. При определенном режиме обработки происходит снятие «гребешков» с поверхности детали, т.е. протекает процесс типа электрополировки. После такой обработки на стали получается параметр

шероховатости поверхности $Ra=6,3\div3,2\text{мкм}$. Сведений по применению этого метода при нанесении покрытий на алюминиевые поверхности не имеется, поэтому необходима проверка пригодности этого способа для получения износостойких покрытий на алюминиевых сплавах с минимальной шероховатостью.

Анализ способов формирования покрытий с помощью электроискрового легирования вибрирующим и вращающимся электродом показал большие преимущества последнего [45]. При вибрации анода кривая зависимости привеса катода (детали) от времени имеет максимум и толщина формируемого покрытия в этом случае ограничена. Исследованиями [45,47] установлено, что при увеличении длительности обработки по достижению незначительного по толщине слоя, поверхность детали оказывается не в состоянии принимать материал с анода и сама начинает разрушаться [54]. При этом неважно, каким образом получается покрытие: за счет многослойного последовательного нанесения или увеличения длительности обработки одного и того же места на поверхности детали.

Исходя из описанной выше физической картины получения покрытия с помощью электроискрового легирования, можно предположить, что при получении многослойного покрытия путём промежуточной термообработки (отжига или отпуска) можно добиться снижения внутренних напряжений. Таким образом отодвинуть процесс начала разрушения покрытия в сторону увеличения его толщины. Однако вопрос, каким образом проводить такую термообработку на алюминиевых сплавах, остаётся невыясненным и требует дополнительного изучения.

2.2 Электроды для электроискрового легирования

Согласно критерию Л.С.Палатника, первое направление увеличения износостойкости - получение твёрдого, прочного и относительно толстого покрытия - можно реализовать путём изменения физико-

химических характеристик электрода-анода: уменьшением его плотности и снижением теплопроводности. Этого можно добиться двумя путями: путем применения электродов с регулируемой пористостью и применением электродов с гетерофазной структурой. [23,24]

Пористые электроды можно изготавливать только такими способами, которые обеспечивают получение в электродах заданной пористости. К таким способам из широко известных и применяемых в настоящее время относятся порошковая металлургия и литьё под давлением.

Достоинством метода порошковой металлургии является возможность получения материалов с характеристиками, недостижимыми для других методов изготовления. При помощи этого метода можно получать материалы из аморфных сплавов с ультрадисперсной структурой, которые обладают уникально высокими свойствами: механическими, износостойкими, антифрикционными и т.д.. Применение, например, в качестве анодов стандартных порошковых сплавов типа САП1 САП5, которые содержат оксиды алюминия с размерами зерна $\leq 100\text{мкм}$ и менее, может дать очень интересные результаты.

Литьём под давлением тоже можно получать электроды с заданной пористостью.

Достоинствами способа является высокая производительность и возможность получать электроды нужного диаметра (1...10мм) без последующей механической обработки.

Недостатком можно считать возможность получать электроды только из цветных сплавов.

Электроды, изготовленные из материалов с гетерофазной структурой, содержащие микродисперсные частицы и нанонити, вкрапленные в матрицу, могут значительно изменить свойства покрытия. Это объясняется тем, что нитевидные монокристаллы и поликристаллы, особенно нанометровой размерности, обладают исключительно высокой прочностью и твёрдостью. Уменьшение размера зерен металлов с 10 мкм до 10 нанометров дает повышение прочности в 30 раз [38]. При этом обнаружено еще одно уникальное

свойство наноструктур: при увеличении прочности одновременно растет пластичность. Рост пластичности объясняется изменением механизмов деформации, когда наряду с движением дислокаций, активное участие начинают принимать процессы на границах нанозерен, в частности, зернограницное проскальзывание. Так в наноструктурных алюминиевых сплавах была получена прочность ≈ 800 МПа, что в 2 раза превышает прочность самого прочного литого алюминиевого сплава состава Al-Zn [35]. При высокоскоростной деформации алюминиевого сплава с наноструктурой получено рекордное значение сверхпластичности: относительное удлинение достигло величины $\sim 1620\%$, при относительном удлинении обычного сплава 20-30%. Перспективным направлением использования наноматериалов является возможность их добавок в небольших количествах к обычным сплавам при изготовлении электродов-анодов [36,37] и др.

Оказывается, что добавление всего лишь 0,5% частиц с нанометровой размерностью в материал анода значительно меняет свойства изделия, увеличивая ударную вязкость сплава в 1,5 раза. Отсюда можно сделать предположение, что если в электродах для электроискрового легирования алюминиевых сплавов будет всего лишь несколько процентов частиц с нанометровой размерностью, то это может привести к значительному улучшению свойств покрытия.

В последнее время увеличилось количество исследований, посвященных наноструктурированию поверхности металлов и сплавов электроискровой обработкой [37,38,]. наноструктурирование стали 35 электродами на основе карбида вольфрама с добавкой нанопорошков Al_2O_3 . Установлено, что на катодной поверхности образуются упорядоченные скопления нанокластеров, состоящих из наночастиц размером до 30 нм. При этом подчеркивается, что добавки в электрод-анод из твердого сплава ВК8 всего лишь 1% Al_2O_3 , повышает эффективность формирования легированного слоя в 3 раза, а микротвёрдость покрытия становится в 3-4 раза выше микротвёрдости стали

Исследование формирования структуры и рельефа поверхности металлов под действием электроискрового легирования на медной и никелевой фольге показало [88], что в результате перекристаллизации поверхность фольги наноструктурируется и на поверхности фольги образуется ячеистая структура из мелких кристаллитов размером порядка ~ 100 нм, что соответственно приводит к значительному улучшению свойств.

В работе [7] исследовалось формирование наноструктурных электроискровых покрытий на стали 20Х электродами из стали марок 85, 65Г, Св08, при этом получено повышение износостойкости в 1,8-2,4 раза.

Обширные исследования [18,29,36] по влиянию нанокристаллических порошков на процесс формирования структуры и свойства покрытий электродами разного химического состава показали, что введение в состав электродного материала наночастиц приводит к увеличению микротвердости и износостойкости покрытий, при этом повышенная концентрация нанокристаллических частиц наблюдается именно в поверхностном слое покрытия.

Из обзора работ, посвященных исследованию структуры и свойств электроискровых покрытий, следует, что улучшение физико-механических свойств, и в частности, износостойкости, способствует применению электродов-анодов с включениями из компонентов, имеющих наноструктурное строение. При этом количество нанодобавки может не превышать 1-5% от объема электрода. Однако получение таких электродов является технологически сложным и экономически дорогим. Исходя из сказанного, необходимо отметить, что следует изучить возможность получения электродов - анодов более простым способом с получением в электродах наноструктурных (или близких к ним по размерам) элементов.

2.3 К расчету параметров электроискрового легирования

Схема установки для электроискрового легирования представлена на рис.

2.1. Генератор униполярных импульсов 1 типа RC подключается к электродам,

причем катодом служит легируемая поверхность детали 2, а анодом — заостренный легирующий электрод 3 [10].

Рисунок 2.1- Схема установки для электроискрового легирования

В зависимости от параметров искрового разряда количество материала, выброшенного из анода и катода, может изменяться. При легировании обеспечивают условия, при которых выброс происходит преимущественно из анода. При каждом разряде с анода удаляется весьма малая частичка материала, которая или является отходом (если процесс протекает в жидкой среде как при электроэрозионной обработке) или достигает поверхности катода и осаждается на ней. Такой эффект процесса электрической эрозии, осаждение на катоде выброшенных из анода частиц, используется при электроискровом легировании металлических поверхностей.

При прохождении между электродами одиночного электрического разряда на поверхности катода образуется лунка с краями, несколько приподнятыми над исходной поверхностью металла, что имеет место в результате деформации металла, расплавившегося в месте прохождения разряда. Материал, перенесенный с анода, располагается на вогнутой поверхности лунки. Размер лунки и качество перенесенного материала обусловлены энергией разряда.

Качество материала, осаждаемого на легируемой поверхности, зависит от удельной продолжительности процесса, то есть от времени легирования единицы поверхности. На рис. 2.2 прямая линия 1 показывает, что в течение всего времени легирования анод равномерно “подает” одинаковые порции материала.

Рисунок 2.2- Зависимость количества материала, осаждаемого на легируемой поверхности от продолжительности процесса

В первые минуты на катоде откладывается наибольшее количество материала (участок АБ кривой 2). В точке «В» максимума кривой 2 изменение массы катода не наблюдается, в этот момент времени количество материала, осевшего с анода, равно количеству материала, удаляемому с катода. В дальнейшем начинается обратный процесс, то есть на катоде осаждается материала меньше, чем выбрасывается за один импульс. Удельная продолжительность легирования, при которой наступает максимум покрытия, зависит от энергии единичного импульса и химического состава материалов электродов.

Наличие максимума в кривой свидетельствует о невозможности получения покрытий большой толщины. Обычно толщина покрытия при чистовом легировании составляет 50...80 мкм, при грубом —100...200 мкм. Причины, ограничивающие толщину покрытия, пока полностью не выяснены.

Расчет массы материала МТ, осаждаемого на катоде за время одного контакта электрода:

$$M_T = \frac{\left[0,44 U_0^2 C \frac{R_A}{R_{\text{ц}}} - \frac{C_A m_A (t_H - t_0)}{f \tau_H} \right] \cdot (1 - \beta)}{C_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t_0) + L_{\text{п}} + \beta \cdot [C_{\text{и}}(t_{\text{и}} - t_{\text{п}}) + L_{\text{и}}]} \cdot n \cdot \nu, \quad (2.1)$$

где n – коэффициент, учитывающий массу расплавленного материала, оставшегося на аноде при размыкании электродов; ν – коэффициент, учитывающий массу материала, потерянного на разбрызгивание и испарение при взрыве металлического мостика; β – коэффициент, характеризующий отношение между массой испарившегося и плавного материала; $C_{\text{п}}$ – удельная теплоемкость материала в процессе плавления, Дж/(кг·°C); $C_{\text{и}}$ – удельная теплоемкость материала в процессе испарения, Дж/(кг·°C); $t_{\text{п}}$ – температура плавления, °C; $t_{\text{и}}$ – температура испарения, °C; $L_{\text{п}}$ – теплота плавления, Дж/кг; $L_{\text{и}}$ – теплота испарения, Дж/кг; C_A – удельная теплоемкость материала анода, Дж/(кг·°C); m_A – масса анода, кг; t_H – температура нагрева анода, °C; t_0 – начальная температура анода, °C; f – частота подачи импульса тока, Гц; τ_H – длительность обработки, с; $R_{\text{ц}}$ – сопротивление цепи при контакте электродов, Ом; R_A – сопротивление электрода, Ом.

Используя работы В.М. Куляпина, коэффициент β можно представить в виде:

$$\beta = 0,405 \cdot \left\{ 1 - 2,5 \left[\frac{L_{\text{п}} + C_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п}} - t_0)}{L_{\text{и}} + C_{\text{и}} \cdot (t_{\text{и}} - t_{\text{п}})} \right] \right\}, \quad (2.2)$$

Диаметр лунки определяется:

$$D = \frac{\sqrt{\frac{m}{\pi \rho h}}}{2} \quad (2.3)$$

Площадь обрабатываемой поверхности определяется:

$$S_{\text{эмо}} = \pi \cdot d \cdot L \quad (2.4)$$

где d – диаметр детали, мм;

πd - длина строки (длина окружности цилиндрической поверхности детали);

L - длина детали, мм.

Шаг разрядов по строке:

$$S_p = d_t \cdot K_{пер}, \quad (2.5)$$

Коэффициент перекрытия лунок в строке должен быть равен коэффициенту перекрытия лунок между строками. Шаг по строкам (расстояние между центрами лунок двух соседних строк) определится:

$$S_{стр} = S_p = d_n \cdot K_{пер}, \quad (2.6)$$

Время между разрядами определится:

$$t_p = \frac{1}{f_u}, \quad (2.7)$$

где t_p - время между разрядами;

f_u - частота следования искровых разрядов генератора ЭИИ.

Количество разрядов в строке определится:

$$n_p = \frac{\pi \cdot d}{S_p} = \frac{\pi \cdot d}{d_n \cdot K_{пер}}, \quad (2.8)$$

Время прохождения одной строки определится:

$$t_{стр} = t_p \cdot n_p = \frac{\pi \cdot d}{d_n \cdot K_{пер} \cdot f_u} \quad (2.9)$$

Линейная скорость перемещения по строке при вращении детали определится:

$$v_{стр} = \frac{\pi \cdot d}{t_{стр}} = d_n \cdot K_{пер} \cdot f_u \quad (2.10)$$

Количество строк определится:

$$n_{стр} = \frac{L}{S_{стр}} = \frac{L}{d_n \cdot K_{пер}}, \quad (2.11)$$

Общее время легирования - время прохождения длины L при продольной подаче определится:

$$t_{ЭИЛ} = t_{ср} \cdot n_{ср} = \frac{\pi \cdot d}{f_u \cdot d_n^2 \cdot K_{ср}^2} = \frac{f_u}{v_{ср}^2} \quad (2.12)$$

Удельное время легирования определится:

$$t_{уд} = \frac{t_{ЭИЛ}}{S_{ЭИЛ}} = \frac{1}{f_u \cdot d_n^2 \cdot K_{ср}^2} = \frac{f_u}{v_{ср}^2} \quad (2.13)$$

Линейная скорость вращения детали определится:

$$v_{ср} = \sqrt{\frac{f_u}{t_{уд}}} \quad (2.14)$$

Скорость продольной подачи определится:

$$v_{ср} = \frac{L}{t_{ЭИЛ}} = \frac{L}{t_{уд} \cdot S_{ЭИЛ}} = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot t_{уд}}, \quad (2.15)$$

Две последние формулы позволяют устанавливать значение линейной скорости вращения детали и скорости продольной подачи в зависимости от требуемого удельного времени легирования. При измерении частоты следования искровых разрядов в Гц, удельного времени легирования в мин/см², диаметра цилиндрической поверхности детали в мм эти формулы, определяющие режим обработки, имеют следующий вид:

$$v_{ср} = \frac{100}{\pi \cdot d \cdot t_{уд}}, \text{ мм / мин}, \quad (2.16)$$

$$v_{\text{сп}} = 10 \sqrt{\frac{60 f_{\text{ц}}}{t_{\text{зд}}}}, \text{ мм / мин.} \quad (2.17)$$

Частота следования импульсов для генератора RC-схемы

$$f = \frac{1}{2,3 \cdot RC \ln \frac{U_0 - U_k}{U_0 - U_{\text{ПР}}}}, \quad (2.18)$$

где R – сопротивление первичного контура генератора;

C – емкость конденсаторов;

U_0 – напряжение холостого хода при разомкнутых электродах;

U_k – напряжение в конце импульса разряда;

$U_{\text{ПР}}$ – напряжение пробоя межэлектродного промежутка.

Оптимизация производительности достигается за счет использования соотношения $I_{\text{м.к}} / \tau_{\text{ц}}$ (для диапазона тока 10 – 100 А отношение $I_{\text{м.к}} / \tau_{\text{ц}} = 5-8 \text{ мА/с}$).

Энергия импульса $A_{\text{и}}$ для генераторов, работающих по RC-схеме:

$$A_{\text{и}} = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2.19)$$

где C - емкость конденсаторов, мФ.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований включает:

1. нанесение покрытия из различных материалов на поверхности лабораторных образцов;
2. определение микротвердости, шероховатости и структуры покрытий;
3. определение износостойкости покрытий.

3.2 Методика получения покрытий и изготовления технологических образцов

Для формирования покрытий и последующего исследования их физико-механических свойств был разработан технологический образец.

Образцы изготавливались фрезерованием из листа сплава Д1 (ГОСТ 4784) следующего состава: Cu $3,8 \div 4,8\%$; Mg $0,4 \div 0,8\%$; Mn $0,4 \div 0,8\%$; остальное - алюминий.

Подготовка образца под покрытие заключалась в удалении рисок, оставшихся после фрезерования, с помощью наждачной бумаги на шлифовальном станке для приготовления микрошлифов. После шлифования производилась маркировка образца, взвешивание на аналитических весах марки ВЛР-200 с точностью до четвёртого знака, а затем нанесение покрытия и повторное взвешивание для определения изменения веса образца (рис.3.1). Ширина и длина пластины 25x50 мм.

Установка ЭИУ-1 для электроискрового легирования имеет мощность $W = 0,15$ кВт и предназначена для формирования электроискровых покрытий самых

различных видов. Несмотря на небольшую мощность установка обладает широкими технологическими возможностями.

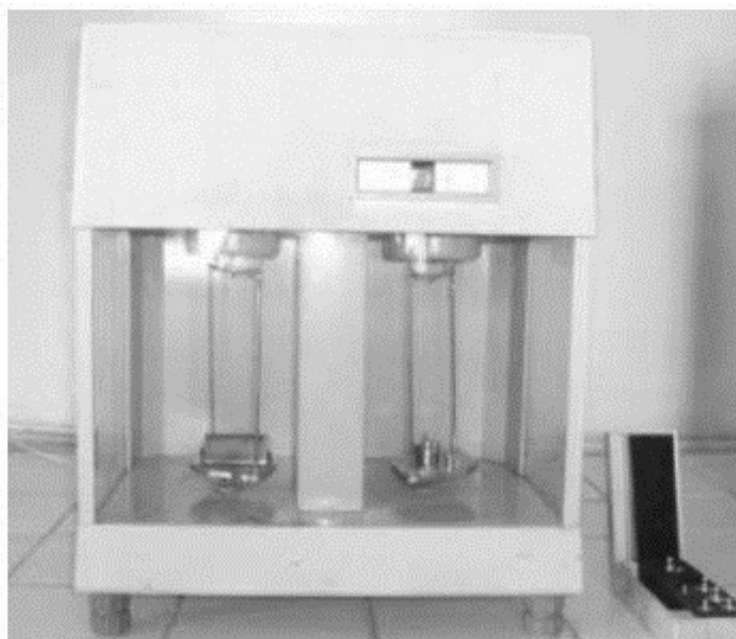


Рисунок 3.1 - Вес образцов определяли на весах модели ВЛР-200 г

Таблица 3.1 - Параметры покрытия, получаемого на установке

Режим	Толщина покрытия, мм	Шероховатость покрытия R_a , мкм	Производительность, $\text{см}^2/\text{мин}$
1	0,01	3	6,0
2	0,03	10	6,0
3	0,05	20	6,0
4	0,07	30	6,0

Прибором для электронисковой обработки служила установка ЭИУ-1 ГОСНИТИ (рис. 3.2).

Особенностью этой установки является компактность, малые габариты, небольшая потребляемая мощность.

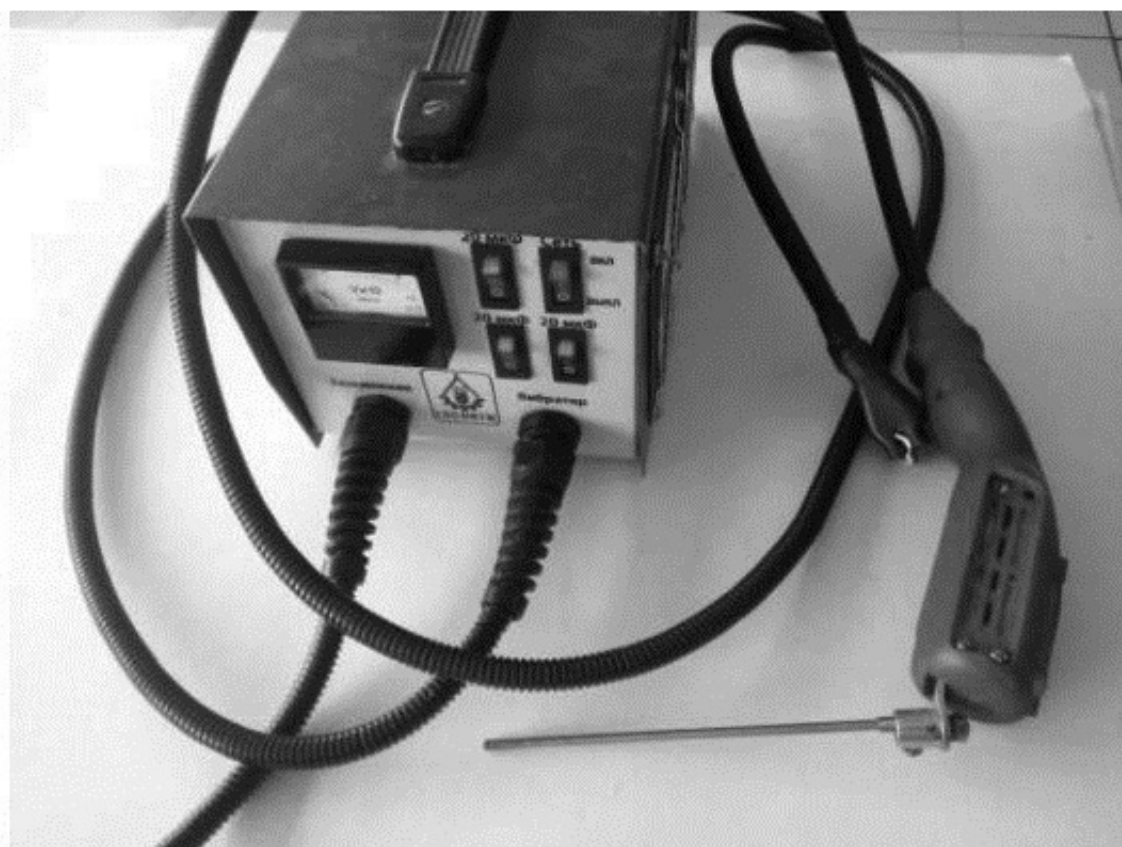


Рисунок 3.2 – Общий вид установки ЭИУ-1 ГОСНИТИ

В качестве обрабатывающих электродов использовались стержни диаметром от 2 до 4 мм и длиной 20мм, отлитые из антифрикционного сплава Al-Sn (АО20-1). Согласно ГОСТ 14113-78 сплав содержит :17÷23% Sn; 0,7÷1,2% Cu; 0,02÷0,2% Ti; остальное–алюминий.

Обрабатывающие электроды из алюминиевого сплава Al-Sn изготавливались на специализированном предприятии из химического состава в графитовом тигле, установленном в индукторе высокочастотной установки.

При ручном нанесении покрытий на образцы из алюминиевого сплава использовалась следующая технология:

1. для обеспечения единообразия и одинаковых условий проведения процесса электронского легирования технологические образцы применялись только одного размера и не проходили никакой специальной

- подготовки поверхности (мойки, обезжиривания и т.д.);
2. скорость перемещения обрабатывающего электрода выбиралась такой, чтобы общее время обработки составляло около 4 мин/образец;
 3. электрод держался перпендикулярно по отношению к обрабатываемой поверхности. Допускался наклон не более $10...15^\circ$;
 4. рабочая часть электрода имела форму конуса с радиусом при вершине 2...4мм;
 5. при изнашивании конца электрода форма периодически восстанавливалась путем его правки;
 6. скорость перемещения электрода поддерживалась равномерной. Покрытие наносилось полосами. Обрабатывающий электрод перемещался вручную круговыми движениями с перекрытием предыдущих слоев на 0,25 величины полосы;
 7. электрод во время движения не отрывался от обрабатываемой поверхности от начала обработки методом электроискрового легирования и до конца. Это было необходимо, т.к. при отрыве обрабатывающего электрода от образца возникает сильное искрение, приводящее к местной эрозии обрабатываемой поверхности (в виде лунки), и к изменению параметров привеса (или уноса) как технологического образца, так и обрабатывающего электрода;
 8. при нанесении покрытия вручную использовался только вибрирующий электрод с постоянной частотой вибрации ($\sim 100\text{Гц}$);
 9. использовались все 4 режима работы установки ЭИУ-1. После оптимизации процесса электроискрового легирования были выбраны режимы 3 и 4, амплитуда вибрации 0,5;
 10. покрытие наносилось на широкую поверхность технологического образца.

При ручном нанесении покрытий стабильные параметры сохранить затруднительно, так как скорость перемещения обрабатывающего электрода по поверхности образца, усилие прижима его к образцу, размер перекрытия следов нанесенного слоя задаются оператором и могут значительно колебаться (срабатывает «человеческий фактор»). В таких условиях важные параметры технологического процесса становятся плохо контролируемыми.

Электронискровое легирование технологических образцов проводили в обычной атмосфере, так и в атмосфере аргона при указанных выше режимах обработки.

Получение покрытий методом электронискрового легирования в ручном режиме для испытаний на износостойкость осуществляли следующему методу: нанесение покрытия производили последовательно по 0,25 части технологического образца в течение 1 мин, то есть общее время нанесения покрытия на образец составляло 4 мин.

3.3 Методика исследования свойств поверхности покрытий

Поверхность образцов исследовалась до и после обработки с целью изучения структуры с помощью металлографического анализа.

Металлографическому анализу подвергались как обрабатывающие электроды, так и технологические образцы, из которых шлифы размером $(8 \times 8) 10^{-3}$ м. Металлографический анализ шлифов проводился на исследовательском металлографическом микроскопе МИМ-7 (рис. 3.3), при различных увеличениях.

При увеличении $\times 200$ оценивалась сплошность покрытия (наличие пористости и трещин), а при увеличении $\times 800$ изучалась микроструктура обрабатывающего электрода, покрытия и образца. По характеру границы между основным металлом и нанесенным слоем оценивался уровень прочности их соединения. Наличие диффузионного слоя, который обеспечивает хорошую адгезию покрытия с основным металлом, оценивалось по размытости границы между основным металлом и покрытием: если граница четкая, то это - механическое сцепление, если размытая - диффузионное.

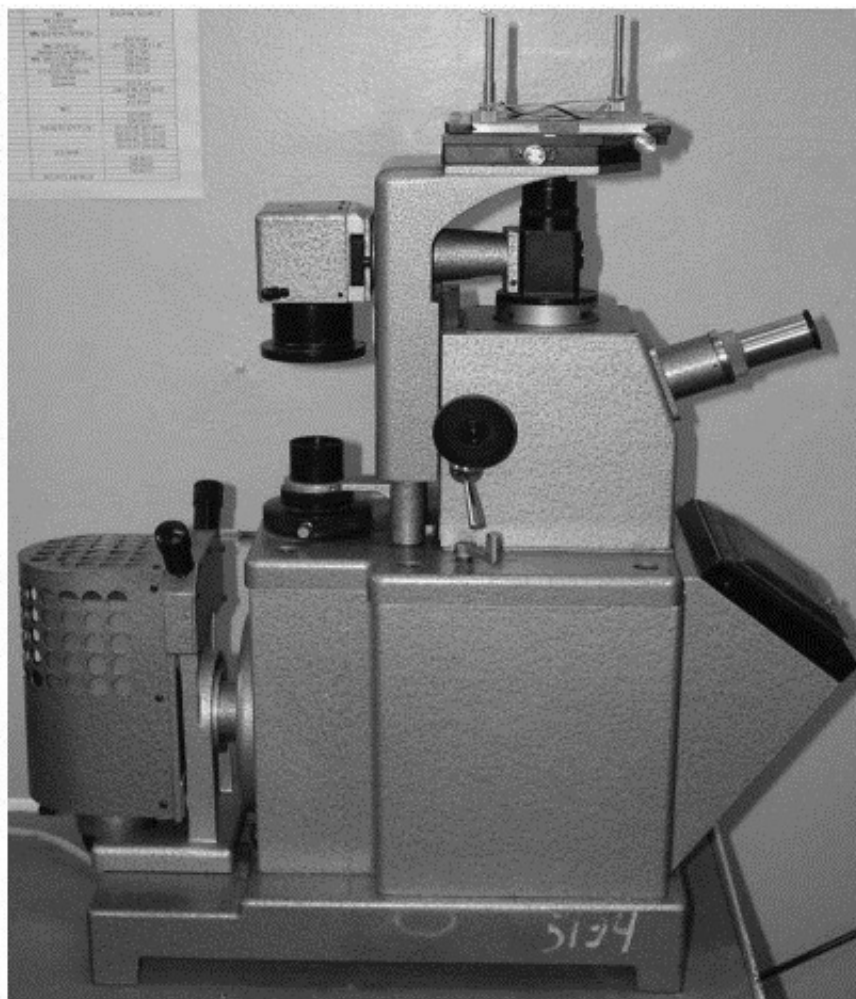


Рисунок 3.3 - Общий вид металлографического микроскопа МИМ-7

Процесс изготовления шлифов для оптической микроскопии включал вырезку образца, шлифование, полирование и травление для выявления микроструктуры. Для травления алюминиевых образцов использовался следующий состав травителя: [31]

$\text{HF}=1$ мл, $\text{HNO}_3 = 2,5$ мл, $\text{HCl} = 1,5$ мл; $\text{H}_2\text{O} = 95$ мл.

Время травления $3 \div 5$ сек.

Практика показала, что указанный реактив позволяет хорошо выявить структуру, как основного металла, так и покрытия. Так как толщина покрытия на образце небольшая, то использовали методику косого шлифа, которая позволяет детально рассмотреть структуру покрытия и облегчить измерение его толщины (или модифицированного слоя поверхности), а также облегчить измерение микротвёрдости. Для получения косого шлифа образец шлифуется и полируется

под углом $6^{\circ} \pm 1^{\circ}$, для чего под таким углом образец устанавливается в оправке. Для получения такого шлифа образец заливался холоднотвердеющей пластмассой (стирокрил, эпоксидная смола). Микрофотографии шлифов получали с помощью цифрового фотоаппарата, после чего проводился анализ полученных снимков структур.

Шероховатость поверхности образцов по R_a и её профиль определялись с помощью профилографа-профилометра («профилографа-профилометра Mitutoyo SJ-201P», Япония) (рис. 3.4).



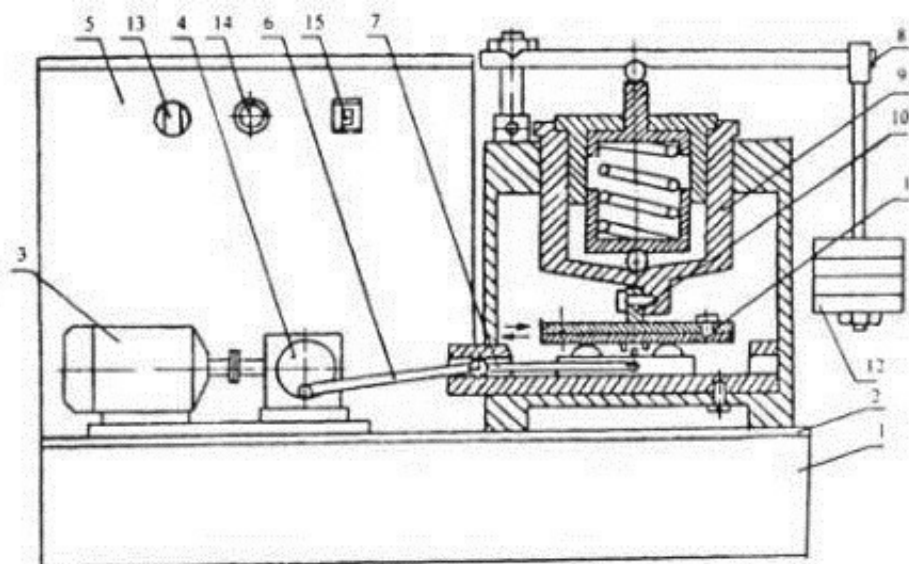
Рисунок 3.4- Измерение шероховатости образцов с помощью прибора профилографа-профилометра Mitutoyo SJ-201P

Измерения проводились по 12 точкам при длине трассирования $12,5 \times 10^{-3}$ м. На основе полученных измерений определяли среднее значение R_a и стандартное отклонение.

Для определения микротвердости покрытий в данной работе использовался прибор марки ПМТ-3, серийно выпускаемый ПО Точприбор (г. Иваново) по усовершенствованной стандартной методике. К недостаткам метода измерения микротвердости прибором ПМТ-3 можно отнести высокий уровень погрешностей, особенно возрастающий при испытании покрытий с применением малых нагрузок. Величина погрешности зависит от идентичности нагружения, выбора оптимальной нагрузки, качества настройки систем прибора, точности измерения диагоналей отпечатков и т.д., другой особенностью определения микротвердости покрытия является необходимость многочисленных манипуляций с числами.

3.4. Методика проведения трибологических испытаний образцов

Тестовые испытания на износ полученных покрытий проводили на машине трения 77МТ-1 конструкции Гаркунова с возвратно-поступательным движением образца относительно контртела (рис 3.5).



1-основание; 2-станина; 3-двигатель постоянного тока; 4-редуктор; 5-панель управления; 6-шатун; 7-ползун; 8-рычаг; 9-стакан; 10-истираемый (испытываемый) образец; 11-подвижная тарелка (нижний образец); 12-навеска с гирями; 13-регулятор скорости движения подвижной тарелки; 14-индикатор напряжения сети; 15-сетевой выключатель

Рисунок 3.5 -Схема машины трения 77МТ-1

Машина трения с возвратно-поступательным движением обеспечивает «мягкие» условия испытаний. Испытывались прямоугольные образцы из алюминиевого сплава Д1 (ГОСТ 4784), подвергнутые электроискровой обработке обрабатывающими электродами из сплава АО20-1 или АС20-1 при различных режимах электроискрового легирования. Для сравнения в некоторых экспериментах осуществляли электроискровым легированием малоуглеродистой стали обрабатывающими электродами из вышеуказанного сплава. Кроме того, опять же для сравнения, в ряде опытов проводили

тестовые износные испытания необработанных с помощью электроискрового легирования образцов из алюминиевого сплава Д1.

Главным звеном машины трения является асинхронный электродвигатель, осуществляющий преобразование электрической энергии в механическую, а именно - во вращательное движение. Далее, через червячный редуктор и кривошипно-шатунный механизм вращательное движение трансформируется в возвратно-поступательное, таким образом образцу через соответствующую кинематическую цепь сообщается возвратно-поступательное движение. Контртело в этот момент жестко зафиксировано на определенной высоте над образцом. На контртело действует заранее заданная нагрузка, которая определяется весом наложенных грузов. Во время приработки и основной части испытаний нагрузка меняется.

В качестве контртела были использованы прямоугольные образцы из закаленной стали 45 с микротвёрдостью 6500 ± 500 МПа.

Скорость перемещения образца относительно контртела (скорость возвратно-поступательного движения) составляла 45 двойных ходов в минуту (0,07 м/сек). Испытания проводили как всухую (без смазки) так и со смазкой. В качестве смазочного материала использовалось индустриальное масло И-20.

Тестирование проводили в два этапа. На первом этапе осуществляли приработку контртела к исследуемой поверхности. Ее проводили в течение 10 часов испытаний с изменяющейся нагрузкой от 2 до 10 МПа. При этом приработка при начальной и конечной нагрузке осуществлялась в течение 2 часов, а при использовании промежуточных нагрузок в течение 1 часа. На втором этапе осуществляли тестовые испытания при нагрузке 10 МПа в течение 20 часов. После электроискрового легирования, а также в тех случаях, когда поверхность перед износными испытаниями не подвергалась электроискровой обработке, проводили измерение веса исходного образца и его шероховатости (R_a) (рис. 3.6).

В качестве интервального для всех значений приводится стандартное

отклонение от среднего арифметического (характеризующее точность определения среднего), а для среднего значения по всем образцам приводится стандартное отклонение (характеризующее точность метода определения).

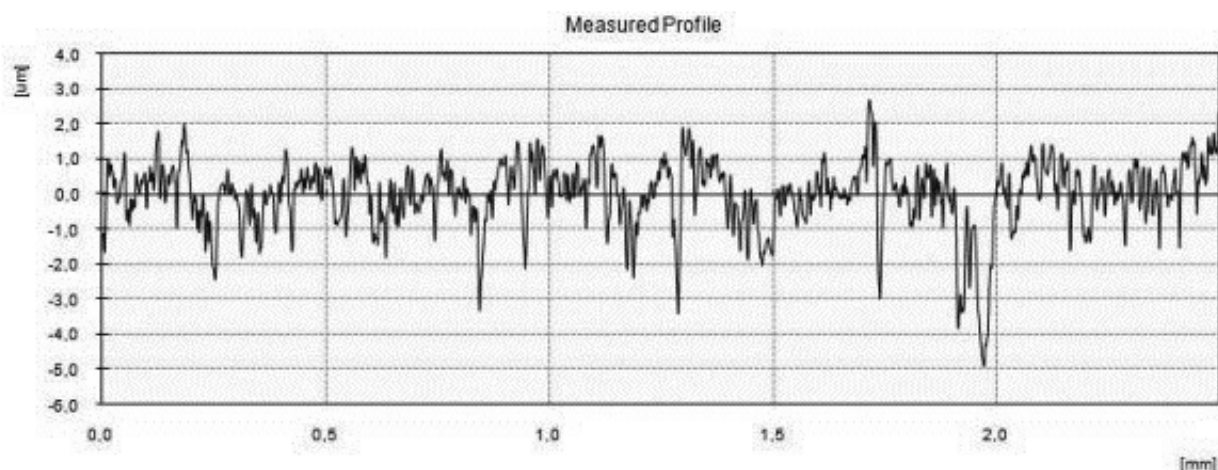


Рисунок 3.6 -Результаты измерения исходной шероховатости образца.

3.5 Методика определения толщины покрытия

Для определения толщины покрытия используется следующая формула:

$$h = \frac{m_2 - m_1}{S \cdot \gamma}, \quad (3.1)$$

где h – толщина покрытия, мм;

m_1 - масса пластины до восстановления, г;

m_2 - масса пластины после восстановления, г;

S - площадь пластины, см²;

γ - плотность металла, г/см³.

Площадь пластины определяется S (см²) по формуле:

$$S = a \cdot b, \quad (3.2)$$

где a, b размеры пластины, см.

Ширина и длина пластины 25х50 мм.

Для определения толщины латунного покрытия после ЭИЛ применяли рычажный микрометр МР-25.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты экспериментов по наращиванию поверхностей

С целью определения закономерностей получения покрытий на алюминиевых сплавах с помощью электронского легирования обрабатываемыми электродами из сплава Al-Sn был проведен ряд экспериментов с изменяющимися параметрами работы установки ЭИУ-1.

Результаты экспериментов по нанесению покрытий в ручном режиме приведены в таблицах 4.1

Таблица 4.1 - Результаты опытов по переносу вещества Al-Sn с электрода на алюминиевую подложку

№ образца	Условия электронского легирования		Вес образца г.		Изменение веса, $\Delta m_{обр}$, г	Вес электрода, г		Изменение веса $\Delta m_{эл}$, г.	Коэффициент переноса $K = \Delta m_{эл} / \Delta m_{обр} $
	Режим	Время обработки	До покрытия	После покрытия		До покрытия	После покрытия		
1	2	60	8,514	8,556	+0,042	2,517	2,477	-0,043	4,75
		60	8,556	8,556	+0,001	2,477	2,472	-0,005	
		60	8,556	8,555	-0,001	2,472	2,461	-0,011	
		60	8,555	8,554	-0,001	2,461	2,457	-0,004	
2	3	60	10,260	10,295	+0,035	8,457	8,417	-0,040	1,14
		60	10,294	10,290	-0,005	8,417	8,414	-0,003	
		60	10,290	10,288	-0,002	8,414	8,410	-0,004	
		60	10,288	10,294	+0,006	8,410	8,396	-0,004	

Слой покрытия наносился последовательно, один на другой с перерывом на взвешивание. Слой покрытия наносился за 60 секунд по всей длине образца. Всего наносилось 4 слоя

При электроискровом легировании на 1 режиме происходит изменение поверхности - появляются лунки, изменяется цвет со светлого на серый, увеличивается шероховатость, происходит модифицирование поверхности.

Опыты показали, что привес образцов обеспечивается только на 2 и 3 режимах. После небольшого времени работы установки было обнаружено, что рабочий конец электрода покрывается чёрным налётом. По предположению, это окись олова, так как из всех соединений, участвующих в процессе переноса веществ, только SnO_2 имеет чёрный цвет.

Результаты экспериментов по получению покрытий на сплаве Д1 при помощи электроискрового легирования электродами из Al-Sn на 3 режиме приведены на рисунке 4.1.

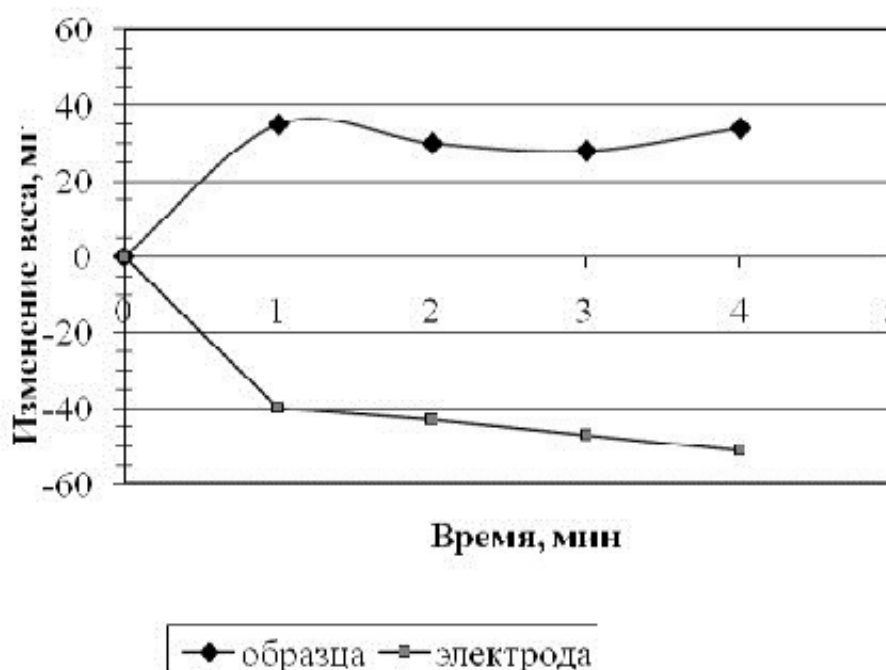


Рисунок 4.1 - Зависимость изменения веса образца и электрода на режиме 3 из Al-Sn (Слой покрытия наносился за 60 секунд по всей длине образца. Всего наносилось 4 слоя)

Как видно из графика основная толщина покрытия наносилась за первый проход. Затем скорость роста покрытия падает почти до нуля. Однако процесс легирования продолжается, и покрытие видимо меняет свои свойства.

Зависимость толщины покрытия от емкости конденсаторов установки электроискрового легирования приведена на рис. 4.2.

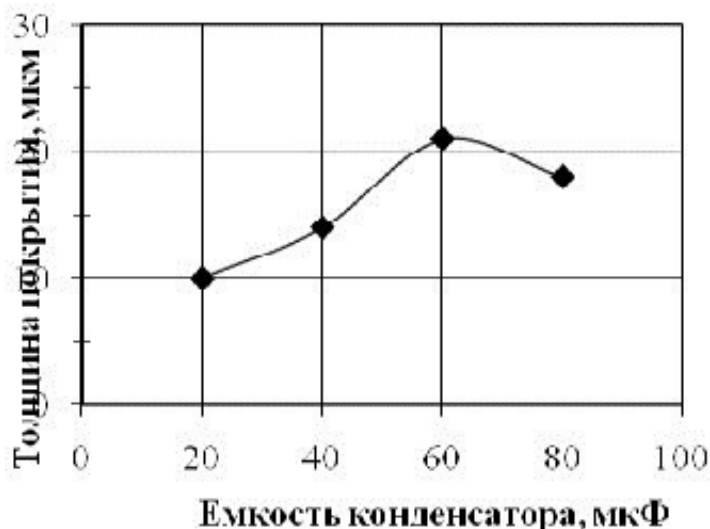


Рисунок 4.2 - Зависимость толщины покрытия от емкости конденсаторов

Толщина покрытия зависит от емкости конденсаторов установки что определяет энергию импульса. Оптимальной емкостью оказалось значение 60 мкФ.

4.2 Исследование микротвердости

Результаты исследования микротвердости приведены на рисунке 4.3

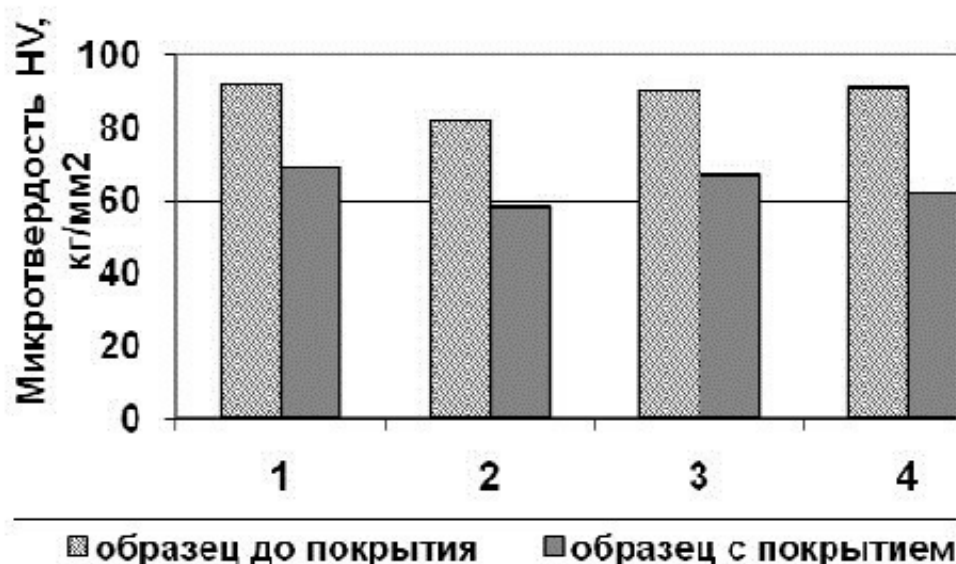


Рисунок 4.3 – Зависимость микротвердости от режима обработки

Исследование микротвердости с помощью прибора ПМТ-3 показало ее увеличение на упрочненной поверхности видимо за счет оксидов алюминия и олова (у которых она достигает HV 1200 кг/мм²). Присутствие таких оксидов в

покрытия даже в небольших количествах могло бы увеличить износостойкость покрытия.

4.3 Результаты исследования износостойкости

Испытания на износостойкость, проведенные по вышеописанной методике показали, что образцы из алюминиевого сплава Д1 с покрытием, полученным с помощью электрон스크рового легирования обрабатывающим электродом из сплава Al-Sn (АО20-1), имеют по сравнению с образцами без покрытия аномально высокую износостойкость. При этом износ образцов с покрытием в несколько раз меньше, чем износ закаленной стали (табл.4.2), из которой изготовлено контртело.

Таблица 4.2 -Результаты износных испытаний при наличии смазки.

Исходная шероховатость R_a , мкм	Притирка		Испытание			
	Шероховатость после притирки R_a , мкм	Износ по времени притирки, ΔU , мт	Шероховатость покрытия после испытания, R_a , мкм	Износ покрытия за время испытания, ΔU , мт	Износ контртела за время испытания, $\Delta U_{кт}$, мт	Коэффициент $U = \Delta U_{кт} / \Delta U$
Без покрытия методом электрон스크рового легирования						
0,70	0,32	70,1	-	66,5	5,4	0,08
0,50	0,18	29,4	-	67,2	5,3	0,08
С покрытием методом электрон스크рового легирования						
19,3	11,1	2,5	7,1	6,2	36,1	5,82
16,2	8,4	3,0	5,5	5,0	31,2	6,24

Максимальный износ образцов из сплава Д1 наблюдается для необработанной электронскровым легированием поверхности (таб.4.2). В этом случае износ контртела по величине на один-два порядка меньше износа образца. В то же время, при обработке образцов из сплава Д1 обрабатывающим

электродом из алюминиевого сплава Al-Sn, износ контртела по величине в среднем на порядок превышает износ образца.

В качестве объяснения высокой износостойкости покрытия было высказано предположение, что покрытие имеет очень высокую твердость, превышающую твердость контртела из закаленной инструментальной стали. Однако замеры микротвердости образцов с использованием твердомера ПМТ-3 с покрытием и без покрытия, а также замеры микротвёрдости контртела показали, что это предположение не оправдалось.

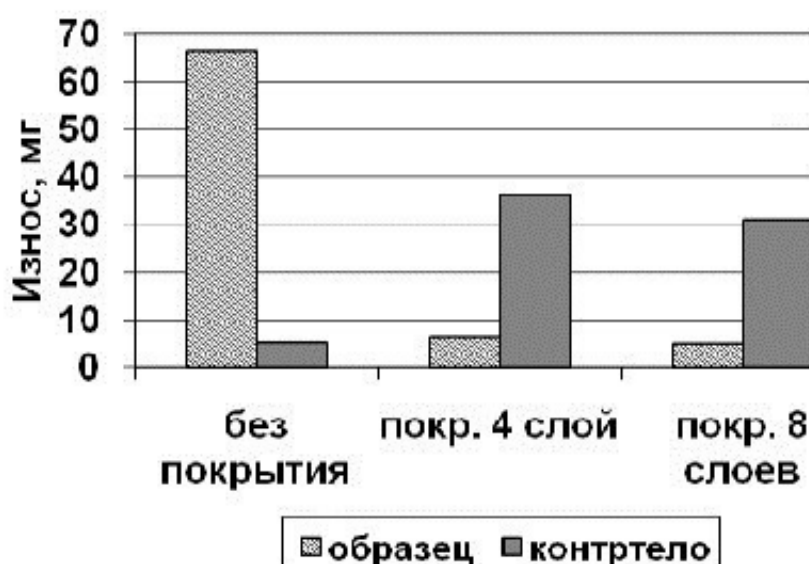


Рисунок 4.4 – Износостойкость образцов

Испытания на износ показали увеличение износостойкости покрытия в до 13 раз по сравнению с неупрочненной поверхностью образца. При этом резко вырос износ контртела из закаленной стали 45, который в 5...6 раз больше чем у покрытия.

Чем больше слоев, тем выше износостойкость, что говорит о продолжении насыщения поверхности при каждом последующем проходе.

При исследовании свойств покрытий, полученных путём электронского легирования поверхности алюминиевого сплава Д1 электродами из сплава Al-Sn, обнаружен эффект аномального износа контртела. Эффект заключается в том, что при микротвёрдости покрытия, не превышающей микротвёрдость материала образца, износ поверхности,

полученной при некоторых режимах нанесения покрытия, на порядок меньше износа контртела, изготовленного из закалённой стали. Исследования, проведённые в работе [38], показали, что эффект аномального износа обусловлен появлением в поверхностных слоях алюминиевого сплава микро – и нанонитей двуокиси олова SnO_2 , имеющих высокую твёрдость HV 1200 кг/мм².

4.4 Исследование шероховатости

Результаты исследования шероховатости в зависимости от времени обработки приведены на рисунке 4.5.

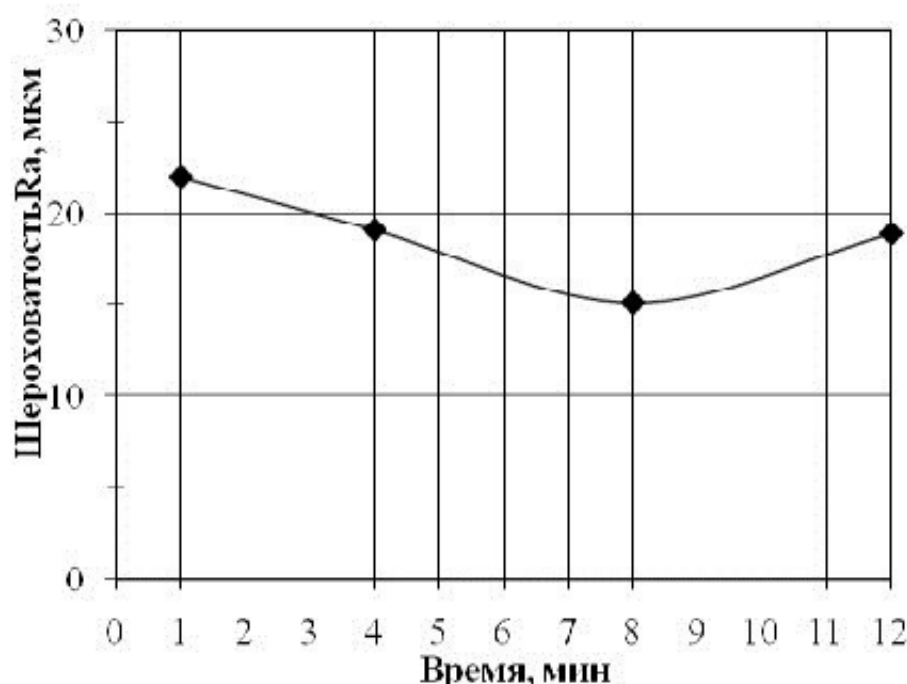
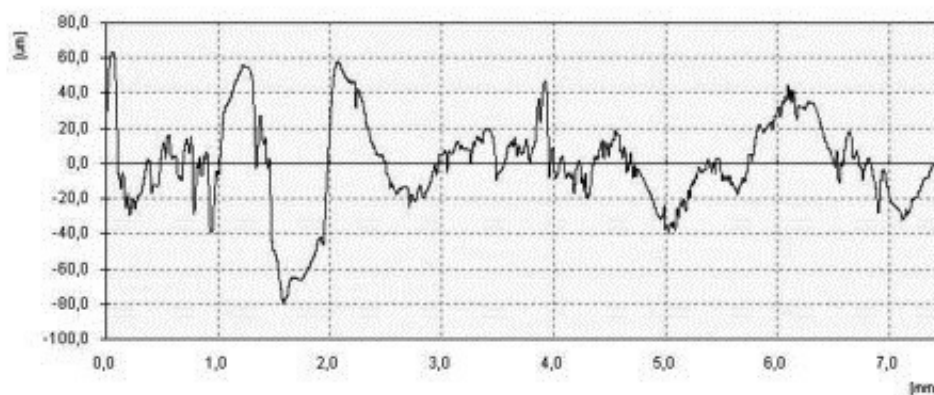


Рисунок 4.5 - Зависимость шероховатости от времени обработки

Исследование шероховатости показало что рационально наносить 8 слоев с точки зрения получения минимальной шероховатости .

Тут интересно посмотреть сам микропрофиль образующийся после электроискрового упрочнения поверхности, который представлен на рисунке 4.6.



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-201	Comment	Ver3.10

Standard	ISO 1997	N	3
Profile	P	L	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	***

Pa	19.30 µm	Pmr	(c) 86 %
Pz	101.6 µm	P3z	***** µm
Pq	24.00 µm	PS	216 µm
Pt	142.6 µm	PSm	528 µm
Pp	51.57 µm		
PPc	23.0/cm		

Copyright (C) 2001-2004 Mitutoyo Corporation

Рисунок 4.6 - Микропрофиль поверхности после электроискрового упрочнения

Как видно из рисунка 4.6, полученный микропрофиль представляет собой множество лунок которые пересекаются между собой.

4.5 Результаты технико-экономической оценки предлагаемого способа восстановления с одновременным упрочнением

Одним из многочисленных примеров практического использования результатов исследования может являться эффективный, экологически чистый способ восстановления изношенных посадочных мест под подшипники алюминиевых корпусов генераторов, насосов и других алюминиевых изделий.

Экономическая эффективность от внедрения разработанного технологического процесса комбинированного упрочнения лап культиваторов установлена согласно выражению:

$$\mathcal{E}_y = \left(\frac{C_n - C_{\text{ост}}^n}{P_n} - \frac{C_y - C_{\text{ост}}^y}{P_y} \right) P_y \cdot N_r \quad (5.1)$$

где C_n, C_y – отпускная цена новой и упрочненной детали соответственно, руб.;

P_n, P_y – ресурс новой и упрочненной детали соответственно, ч;

$C_{\text{ост}}$ – остаточная стоимость новых и упрочненных деталей после предельного износа, руб.;

N_r – годовой объем упрочняемых деталей, шт.

Таблицу 4.3 - Показатели оценки разработанной технологии упрочнения

Наименование показателей	Обозначения	Вариант	
		новая запчасть	предлагаемый восстановленная
1. Годовой объем упрочняемых деталей, шт.	N_r	—	1000
2. Цена новой детали, руб.	C_n	500	—
3. Себестоимость упрочнения детали, руб.	C_y	—	297
4. Отпускная цена упрочненной детали, руб.	C_y	—	400
5. Ресурс новой детали, ч	P_n	900	—
6. Ресурс упрочненной детали, ч	P_y	—	1170
7. Экономический эффект, руб.	$\mathcal{E}_r$	—	243360
8. Срок окупаемости капитальных вложений, лет	$T_{ок}$	—	0,2

Использование разработанного способа позволит увеличить ресурс алюминиевых деталей после восстановления получить годовой экономический эффект 243360 руб. при сроке окупаемости 0,2 года на программу ремонта 1000 корпусов насосов в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На толщину покрытия влияют емкость конденсатора при этом рациональными режимами являются :напряжение -60В; емкость конденсатора -60мкФ.

2. При испытании на износостойкость при трении в масле износ контртела из закаленной стали превышает износ образца из сплава Д1 с покрытием электродами из сплава Al-Sn полученного путем электроискрового упрочнения, в 13 раз. Износостойкость закаленной стали на порядок превышает износостойкость сплава Д1 без покрытия. Предполагается, что наблюдаемый эффект обеспечивается наличием в покрытии оксидов олова и алюминия.

3. Исследованиями установлено, что изменение технологических параметров режима упрочнения приводит изменению микротвердости на 20...30 %.

4. Шероховатость покрытия зависит от энергии импульса конкретного режима и достигает минимума при количестве слоев около 8.

5. Использование разработанного способа позволит увеличить ресурс алюминиевых деталей после восстановления на получить годовой экономический эффект 243360 руб. при сроке окупаемости 0,2 года на программу ремонта 1000 корпусов насосов в год.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Промышленные алюминиевые сплавы. Москва:Металлургия, 1984. 342 с.
2. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология,применение). Киев: «Коминтех», 2005. 156 с.
3. Арзамасов П.Л. Материаловедение: Справочник. Москва: изд. МГТУ, 2002. 653с.
4. Трухов А.П, Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. Москва: Изд. Академия ISBL, 2004. 336 с.
5. Фетисов Г.П и др. Материаловедение и технология металлов. Москва: ГУП «Издательство «Высшая школа»», 2001. 421 с.
6. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А., Хворостухин Л.А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. Москва, 1998. 98 с.
7. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. Москва: Изд. АН СССР, 1959. С.56.
8. Бельй А.В., Макушок Е.М., Поболь И.Л Поверхностная и упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. Минск: «Навука і тэхніка»,1990. 79 с.
9. Комаров Ф.Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твёрдые тела. Минск: УП Технопринт, 2001. 392 с.
10. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В. и др. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика).Саранск: типография Красный Октябрь, 2003.504 с.
11. Мубоджян С.А., Кабалов Е.Н., Буденовский С.А., Помелов А.Я. Нанесение защитных покрытий на детали ионно – плазменным методом. Из: Авиационная промышленность, 1999, №3, С.65-70.

12. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. Микродуговое оксидирование(теория, технология, оборудование). Москва: Экомет, 2005. 298с.
13. Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Окс Е.М. Анодирование алюминия и кремния в плазме тлеющего разряда. In:Прикладная физика, 2011, №2, С.23-26.
14. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей Москва: Изд. АН СССР. 1958. С. 59.
15. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей.Москва: Машиностроение, 1976. 67с.
16. Gitlevich A.E. and oth. Electric Spark Allouing of Metal Surfaces. Kishinev. Stiintsa,1985. 196 p.
17. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. 303 с.
18. Карабасов Ю.С. Новые материалы. Москва:МИСИС, 2002. 727с.
19. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Потапов М.Г. Новые СВС – материалы для электроискрового легирования с использованием ультрадисперсных порошков In:Известия ВУЗов. Цветная Металлургия, 2000, № 6, С.67-72.
20. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей. Москва: Изд. АН СССР, 1958. 177 с.
21. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электроискровой эрозии в импульсном разряде в жидкой, диэлектрической среде. Автореферат Диссертации д-ра. техн. наук. Москва: МИЭМ, 1968. 62 с.
22. Верхотуров А.Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. Владивосток: Дальнаука, 1992. 180 с.

23. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
24. Верхотуров А.Д, и др. Электродные материалы для электроискрового легирования. Москва: Наука, 1988. 224 с.
25. Pereteatsu Pavel. Интенсификация процесса электроискрового легирования при воздействии внешних источников энергии: Автореф.диссертации. д-ра техн. наук .Кишинев, 2008. 35с.
26. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П. Работоспособности и долговечность восстанавливаемых деталей и сборочных единиц. Саранск: Изд. Мордовского государственного университета им.Н.П. Огарева, 1993. 120 с.
27. Бурумкулов Ф.Х., Лялякин В.П., Пушкин И.А., Фролов С.Н. Электроискровая обработка металлов – универсальный способ восстановления изношенных деталей In: Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2001, №4, С.23-28.
28. Коваленко В.С. и др. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. Москва: Наука, 1986. 277 с.
29. Topala P. ,Ojegov A.,Ursaki V. Nanostructures obtained using electric discharges at atmospheric pressure. In : Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications, Technology, Properties and Devices(ed. I.Tiginyanu, P.Topala, V.Ursaki Springer 2016, pp. 43-83.
30. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рьжов Н.М. и др. Материаловедение: Учебник для вузов. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. С.363.
31. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. Москва:«Металлургия», 1979. С.256.
32. Канарчук В.Е., Чигринец А.Д., Голяк О.Л. Восстановление автомобильных деталей.Технология и оборудование. Москва: Транспорт, 1995. 303 с.

33. Черноиванов В.И. Восстановление деталей машин. Москва: ГОСНИТИ, 1995. 278 с.
34. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов. Учебное пособие-справочник изд.2-е. Киев: Професионал, 2006. 352с.
35. Коваленко В.С., Головки Л.Ф. Повышение износостойкости металлорежущих инструментов с помощью лазерного излучения. In: Технология и организация производства , 1981, №2, С.42-46.
36. Agafii V.I., Yurchenko E.V., Petrenko V.I., Kupcinskas A., Zunda A., Dikumar A.I. Al-Sn Nanostructured Coatings on Aluminum Surfaces Using Electrospark Alloying and Their Wear Behavior *Balttrib' 2013. VII International Scientific Conference. Proceedings Kaunas, Lithuania - November 14-15 2013.* p. 93-99.
37. Yurchenko E. V., Yurchenko V. I. , Yakovets I. V., Dikumar A. I. Changes in Composition and Properties of Tool Electrode during Electrospark Alloying with Al-Sn Alloy. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 2016 Vol. 52 (2). p 157-161.
38. Юрченко Е.В. Увеличение толщины наноструктурированных электроискровых покрытий обрабатывающим электродами из сплава Al-Sn20 на алюминиевых поверхностях. *LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE VOLUMUL 45 INGINERIE AGRARĂ ȘI TRANSPORT AUTO* 2015. С.252-255.

Работы автора:

1. Галиуллин А.Р., Вахитов А.А., Габбасов И.И., Ахметов Д.А.
Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов/ В сборнике: Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса. Материалы международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса. 2020. (в печати)
2. Галиуллин А.Р., Гарипов А.И., Мухаммадиев Б.Ф., Яруллин И.И..
Применение деталей из алюминиевых сплавов в машиностроении и сельскохозяйственной технике / В сборнике: Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса. Материалы международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса. 2020. (в печати)