

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ МОЛДОВА
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ**

На правах рукописи

УДК 621.9.048.4

ЮРЧЕНКО Евгений Владимирович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ
ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ И ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН.**

251.03 – Электрофизические технологии и инженерия поверхности

Диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный руководитель: _____ ДИКУСАР А.И.

член-корреспондент АНМ,
доктор хабилитат хим.наук,
профессор

Автор: _____ Юрченко Е.В.

КИШИНЕВ, 2016

ACADEMIA DE ȘTIINȚE A REPUBLICII MOLDOVA

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ

Cu titlu de manuscris

C.Z.U 621.9.048.4

IURCENCO Evgheni

**TEHNOLOGIA DE OBȚINERE A ACOPERIRILOR
NANOSTRUCTURATE DURIFICATE PRIN SCÂNTEI
ELECTRICE PE ALIAJE DE ALUMINIU ȘI UTILIZAREA LOR
ÎN RESTAURAREA ȘI REPARAREA PIESELOR DE MAȘINI**

251.03 – Tehnologii electrofizice și ingineria suprafețelor

Teză

de doctor în științe tehnice

Conducător științific: _____ DICUSAR A.I.

membru corespondent al AȘM,
doctor habilitat în științe chimice,
profesor

Autor: _____ Iurcenco E.V.

CHIȘINĂU, 2016

© IURCENCO Evgheni 2016

Содержание

СОДЕРЖАНИЕ	4
ADNOTARE	7
АННОТАЦИЯ	8
SUMMARY	9
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	10
ВВЕДЕНИЕ	11
1. АНАЛИЗ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ РЕМОНТЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	18
1.1. Применение деталей из алюминиевых сплавов в машиностроении	18
1.2. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов	20
1.3. Физические основы процесса электроискрового легирования	24
1.4. Механизм образования поверхностного слоя	28
1.5. Режимы процесса электроискрового легирования	30
1.6. Новые технологии электроискрового легирования	32
1.7. Обрабатываемые электроды для электроискрового легирования	34
1.8. Физико-химические закономерности формирования покрытий на сплавах алюминия с помощью электроискрового легирования	36
1.9. Особенности свойств наноматериалов	42
1.10. Выводы и постановка задач исследования	47
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ , ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ . ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ.	49
2.1 Экспериментальное оборудование и режимы для электроискрового легирования	49
2.1.1. Оборудование для нанесения покрытия методом электроискрового легирования в ручном режиме.	49
2.1.2. Установка для нанесения покрытий методом электроискрового легирования в механизированном режиме.	50
2.2 Методика получения обрабатываемых электродов и изготовление технологических образцов	53
2.3 Технология нанесения электроискровых покрытий	56

2.3.1. Методика нанесения покрытий в ручном режиме _____	57
2.3.2 Методика механизированного нанесения покрытий с помощью электроискрового легирования _____	58
2.4 Методика исследования свойств поверхности _____	59
2.5 Методика проведения трибологических испытаний образцов _____	62
2.6 Методика определения скорости износа покрытий на алюминиевых сплавах при испытании на трение по схеме «диск-колодка» _____	64
3. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ЭЛЕКТРОДАМИ ИЗ СПЛАВА Al-Sn _____	68
3.1 Получение покрытий на сплавах Д1 при электроискровом легировании в ручном режиме _____	68
3.1.1 Эффекты переноса массы _____	68
3.1.2 Состав и морфология полученных покрытий _____	77
3.1.3. Физические основы получения микро – и нанонитей _____	80
3.2 Получение покрытий с помощью электроискрового легирования на сплаве Д1 при механизированном нанесении _____	83
3.3 Заключение и выводы _____	87
4. ФИЗИКО – МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДАМИ Al-Sn _____	89
4.1 Механические свойства покрытий, полученных на сплаве Д1 с помощью электроискрового легирования _____	89
4.1.1. Механические свойства покрытий, полученных в режиме нанесения покрытия вручную. _____	89
4.1.2. Свойства покрытий, полученных в условиях механизированного нанесения _____	96
4.1.3. Относительная скорость износа покрытий электроискрового легирования при трении без смазки. _____	98
4.1.3.1 Износные испытания поверхностей, обработанных по режиму 1 (постоянное число слоев) _____	98
4.1.3.2 Износные испытания поверхностей, обработанных по режиму 2 (постоянство энергии, вводимой в искровой промежуток за время обработки) _____	100
4.1.4. Относительная скорость износа покрытий при испытании по схеме «ролик-колодка» _____	103

4.2 Получение и исследование свойств покрытий, полученных электроискровым легированием с помощью электродов из сплава Al-Sn, Al-Pb	109
4.3 Изменение состава обрабатываемых электродов из сплава Al-Sn при электроискровом легировании алюминиевых сплавов	113
4.4 Заключение и выводы	116
5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ	119
5.1 Ремонт посадочных мест под подшипники в корпусных деталях из алюминиевых сплавов	120
5.2 Ремонт алюминиевых радиаторов автомобильных и тракторных двигателей	124
5.3 Расчет экономической эффективности внедрения новой технологии ремонта автотракторных радиаторов	129
5.4 Исследование абразивных возможностей покрытий, полученных с помощью электроискрового легирования на алюминиевом сплаве Д1.	133
5.5 Заключение и выводы	136
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	137
ЛИТЕРАТУРА	140
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	156
ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ	159
CURRICULUM VITAE	160
БЛАГОДАРНОСТИ	162
ПРИЛОЖЕНИЯ	163

ADNOTARE

la teza „**Tehnologia de obținere a acoperirilor nanostructurate durificate prin scânteii electrice pe aliaje de aluminiu și utilizarea lor în restaurarea și repararea pieselor de mașini**”, prezentată de Iurcenco Evghenii pentru conferirea gradului de doctor în științe tehnice, Chișinău, 2016.

Teza este scrisă în limba rusă și constă din introducere, 5 capitole, concluzii generale, recomandări și bibliografia lucrărilor citate. Lucrarea conține 139 de pagini de text, 54 figuri, 29 tabele, bibliografie din 188 titluri.

Publicațiile la tema tezei: rezultatele obținute au fost publicate în 19 lucrări științifice (10 articole, 7 teze și materialele rapoartelor la conferințe), 2 brevete.

Cuvinte cheie: prelucrare cu scânteii electrice, aliere cu scânteii electrice, aluminiu, nanostructurare, rezistența la uzură, micro- și nanofibre ale oxidului de staniu, oxid de aluminiu.

Domeniul de studiu: – Tehnologii electrofizice și ingineria suprafețelor.

Scopul lucrării constă în stabilirea legăturilor de formare a acoperirilor rezistente la uzură pe piesele din aliaje de aluminiu pentru recondiționarea suprafețelor uzate cu ajutorul electrozilor utilizați în alierea cu scânteii electrice (ASE), care reprezintă un amestec mecanic a componentei fuzibile în matricea refractară, și pe această bază – în elaborarea tehnologiei de recondiționare a suprafețelor uzate.

Noutatea și originalitatea științifică a tezei:

S-a constatat că în condiții de aliere prin scânteii electrice cu electrodul-sculă, care reprezintă un amestec mecanic al componentei fuzibile dispersat în matricea refractară, poate avea loc formarea particulelor microdisperse pe suprafața prelucrată, inclusiv a micro- și nano-fibrelor, care constau din componenta fuzibilă și oxizii acesteia, formate în procesul de transfer de la anod, astfel obținându-se un nanocompozit, cu o rezistență înaltă la uzură.

S-a stabilit că în condiții de frecare la o sarcină mică și la o viteză relativ mică de deplasare reciprocă a probei și contracorpului, un rol decisiv în creșterea rezistenței la uzură îl au micro- și nanofibrele din oxid de staniu, iar în condiții de frecare la o sarcină mare și la o viteză mare, rolul micro- și nanofibrelor se nivelează și un rol determinant în rezistența la uzură îl are matricea prelucrată prin ASE.

S-a demonstrat posibilitatea de obținere pe aliaje de aluminiu a unor acoperiri ASE cu grosime sporită, la depunerea periodică a „straturilor-barieră”. În calitate de „strat-barieră” cu cele mai bune proprietăți este aliajul Al-Ni, care permite obținerea unei acoperiri cu grosimea de până la $2 \cdot 10^{-3}$ m.

Problema științifică rezolvată: S-a demonstrat posibilitatea de obținere a unor acoperiri cu grosime sporită la utilizarea ASE pe aliajele de Al, ceea ce este o consecință a formării micro- și nanofibrelor componentei ușor fuzibile și ale oxizilor acesteia în procesul de ASE cu electrozi- scule din aliaj de Al, cu componenta ușor fuzibilă (Sn, Pb).

Obiectul de studiu sunt metodele de formare și proprietățile acoperirilor obținute prin ASE, la depunerea pe matricea din aliaj D 1 cu electrozi-scule din aliaje de Al-Sn (AO20-1), Al-Pb, Al-Ni.

Valoarea teoretică a lucrării: rezultatele obținute pot fi văzute ca o metodă nouă de obținere a micro- și nanofibrelor în acoperiri, la utilizarea ASE, precum și ca o bază pentru elaborarea ulterioară a unor suprafețe nanostructurate, rezistente la uzură.

Implementarea și valoarea practică a lucrării: rezultatele cercetării pot fi puse la baza obținerii unor acoperiri rezistente la uzură din aliaje de aluminiu, atât prin creșterea stratului uzat, cât și fără acesta, prin alierea cu scânteie electrică cu un electrod-sculă din aliaj Al-Sn (AO20-1).

Pe baza rezultatelor cercetărilor a fost elaborată tehnologia de reparare a locurilor de montare a rulmenților pentru piesele din aliaje de aluminiu a automobilelor și tractoarelor și implementată la întreprinderile S.R.L.F. „Moldavizolit RiO”, S.R.L. Î.P.C. „Sovremennîe tehnologii”, „Torgovîi proiect” din or. Tiraspol.

АННОТАЦИЯ

диссертации Юрченко Е.В. «Технология получения упрочняющих наноструктурированных электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах и их использование при восстановлении и ремонте деталей машин.» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, Кишинев 2016.

Диссертационная работа написана на русском языке, состоит из введения, 5 глав, общих выводов, рекомендаций и списка цитируемой литературы. Работа содержит 139 страниц текста, 54 рисунка, 29 таблиц, список литературы, включающий 188 источников.

Публикации по теме исследования: полученные результаты опубликованы в 19 научных работах (10 статей, 7 тезисов и материалов докладов на конференциях), 2 патента.

Ключевые слова: электроискровая обработка, электроискровое легирование, алюминий, наноструктурирование, скорость износа, микро – и нанонити оксида олова, оксид алюминия.

Область исследования: – Электрофизические технологии и инженерия поверхности.

Цель работы состояла в установлении закономерностей формирования износостойких покрытий деталей из алюминиевых сплавов с помощью электроискрового легирования электродами, представляющими собой механическую смесь легкоплавкого компонента в тугоплавкой матрице, и на этой основе - в разработке технологий восстановления изношенных поверхностей.

Научная новизна и оригинальность работы:

Установлено, что в условиях электроискрового легирования электродами, представляющими собой механическую смесь легкоплавкого компонента, диспергированного в тугоплавком, возможно образование на обработанной поверхности микродисперсных частиц, в том числе микро – и нанонитей, состоящих из легкоплавкого компонента и его оксидов, образующихся в процессе переноса с анода, благодаря чему получается нанокомпозит, обладающий высокой износостойкостью поверхности.

Установлено, что в условиях трения при невысокой нагрузке и относительно низкой скорости взаимного перемещения образца и контр-тела, определяющую роль в повышении износостойкости покрытий играют микро - и нанонити из оксидов олова, а в условиях трения с высокой нагрузкой и высокой скоростью роль микро - и нанонитей нивелируется, и определяющую роль играет обработанная методом электроискрового легирования матрица.

Показана возможность получения на алюминиевых сплавах электроискровых покрытий повышенной толщины с периодическим нанесением «барьерных слоёв». В качестве «барьерного слоя» наилучшими свойствами обладает сплав Al-Ni, позволяющий получать покрытия толщиной до $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Решенная научная проблема: Доказана возможность получения с использованием электроискрового легирования на Al сплавах покрытий повышенной толщины, что является следствием образования в процессе электроискрового легирования обрабатываемыми электродами из сплава Al с легкоплавким компонентом (Sn, Pb) микро- и нанонитей легкоплавкого компонента и его оксидов.

Объектом исследования являются методы формирования и свойства покрытий, полученных методом электроискрового легирования, нанесением на матрицу из сплава D1 обрабатываемыми электродами из сплавов Al-Sn (AO20-1), Al-Pb, Al-Ni.

Теоретическая значимость работы: полученные результаты можно рассматривать как новый способ получения микро - и нанонитей в покрытии, при использовании электроискрового легирования, а также как основу для дальнейшей разработки получения наноструктурированных износостойких поверхностей.

Внедрение и практическая значимость работы: результаты исследования могут быть положены в основу получения износостойких покрытий поверхностей из алюминиевых сплавов как с приращением изношенного слоя, так и без него, путем электроискрового легирования обрабатываемым электродом из сплава Al-Sn (AO20-1).

На основании результатов исследований была разработана технология ремонта посадочных мест под подшипники для корпусных деталей автотракторной техники из алюминиевых сплавов и внедрена на предприятиях ДООО «Молдавизолит РиО», ООО ПКП «Современные технологии», «Торговый проект» в г.Тирасполь.

SUMMARY

on the dissertation of E.V. Yurchenko “**Technology of obtaining strengthening nanostructured electrospark coatings on aluminum alloys and their use in the repair of machine parts**”, submitted for the scientific degree of Doctor of Engineering Science,

Chisinau 2016.

The dissertation is written in Russian, it consists of an introduction, four chapters, general conclusions, recommendations and list of references. The paper contains 139 pages of text, 54 images, 29 tables, the list of references which includes 188 sources.

Related publications: the results obtained were published in 19 scientific papers (10 articles, 7 scientific conference abstracts), 2 patents.

Key words: electrospark machining, electrospark doping, aluminum, nanostructuring, wear resistance, microwires and nanowires of tin oxide, alumina.

Area of research: - Electrophysical technology and surface engineering.

The purpose of the paper was to determine the rules of forming wear-resistant coatings of parts made of aluminum alloys through the use of electrospark doping (ESD) by tool electrodes, which are a mechanical mixture of a low-melting component in a hard-melting matrix, and on this basis – to develop technologies of restoring worn surfaces.

Scientific novelty and originality of the paper:

It is determined that microdispersed particles including microwires and nanowires consisting of the low-melting component and its oxides produced during the transfer from the anode may be formed on the treated surface during the electrospark doping by electrodes which are a mechanical mixture of low-melting component dispersed in the hard-melting component, thereby a nanocomposite having high wear resistance is obtained.

It is determined that in conditions of friction under low loads and relatively low speed microwires and nanowires of tin oxide play a crucial role in improving the wear resistance of coatings, and in conditions of friction under high load and high speed the role of microwires and nanowires levels off, and ESD treated matrix plays decisive role.

The possibility of obtaining ESD coatings with increased thickness through periodic application of the “barrier layers” on aluminum alloys is shown. The Al-Ni alloy has the best properties of “a barrier layer”, which allows to obtain a coating with thickness of up to $2 \cdot 10^{-3}$ m.

Scientific problem which was solved: The possibility of obtaining coatings with increased thickness through the use of ESD on the Al alloys was proved, that is a consequence of forming microwires and nanowires of low-melting component and its oxides during the process of ESD by tool electrodes made of Al alloy with a low-melting component (Sn, Pb).

Object of research are the methods of formation and properties of the coatings obtained by ESD through the application on the matrix made of Al alloy by tool electrodes made of Al-Sn alloys (AO20-1), Al-Pb, Al-Ni.

The theoretical significance of the work: we can regard the results obtained as a new way to produce microwires and nanowires in the coating using the ESD, as well as a basis for further development of manufacturing nanostructured wear-resistant surfaces.

Implementation and practical significance of the work: the results of the research can be accepted as a basis for manufacturing wear-resistant coatings of the surfaces made of aluminum alloys both with building-up of the worn-out layer and without it using electrospark doping by tool electrodes made of Al-Sn alloy (AO20-1).

The technology for repairing bearings seats for tractor body parts made of aluminum alloys has been developed on the basis of the research results and it was implemented in such enterprises as subsidiary company Moldavizolit RiO LLC, commercial manufacturing enterprise Sovremennye Tehnologii LLC, Torgovy Proyekt in Tiraspol.

Условные обозначения

$\Delta U_{\text{пр}}$ - износ покрытия во время притирки

ΔU_0 - износ покрытия за время испытания

$\Delta U_{\text{кт}}$ - износ контртела

R_a - шероховатость поверхности, мкм

$R_{a \text{ исх}}$ - шероховатость исходного покрытия, мкм

$R_{a \text{ пр}}$ - шероховатость покрытия, после притирки, мкм

$R_{a \text{ кон}}$ - шероховатость покрытия в конце испытания на износостойкость, мкм

$f_{\text{кон}}$ - коэффициент трения в конце испытания на износостойкость

$f_{\text{пр}}$ - коэффициент трения: в процессе притирки

f_0 - коэффициент трения при основном этапе испытаний.

f - коэффициент трения в конце процесса притирки

U - коэффициент износа

j - плотность тока А /дм²

t - толщина покрытия, мкм.

$\Delta m_{\text{пр}}$ - изменение массы образца при притирке, мг.

$\Delta m_{\text{кт}}$ - изменение массы контртела при основном этапе испытаний, мг.

Δm - изменение массы, мг.

γ - плотность г/см³.

V - скорость перемещения обрабатывающего электрода мм/с

G - удельная скорость обработки мг /с•см²

P - нагрузка, Н

J - энергия импульса

k - коэффициент переноса

Д1 – алюминиевый сплав химического состава Fe до 0,7% ; Si до 0,7% ; Mn 0,4 - 0,8%;
Ni до 0,1%; Ti до 0,1%; Al 91,6 - 95,4%; Cu 3,8 - 4,8%; Mg 0,4 - 0,8%; Zn до 0,3%

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. 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 приращения слоя.

В настоящей работе исследованы закономерности получения износостойких покрытий на алюминиевых сплавах.

Цель работы состояла в установлении закономерностей формирования износостойких покрытий деталей из алюминиевых сплавов с помощью электроискрового легирования электродами представляющими собой механическую смесь легкоплавкого компонента и тугоплавкой матрицы и на этой основе - в разработке технологий восстановления изношенных поверхностей.

Объектом исследования является свойства покрытия, нанесенных методом электроискрового легирования обрабатывающим электродом, представляющими собой механическую смесь легкоплавкого компонента и тугоплавкой матрицы на деталь из алюминиевых сплавов.

Научная новизна и оригинальность работы:

Установлено, что в условиях электроискрового легирования сплавами, представляющими собой механическую смесь легкоплавкого компонента, диспергированного в тугоплавком (системы Al-Sn, Al-Pb), возможно образование на обработанной поверхности микродисперсных частиц, в том числе микро – и нанонитей, состоящих из легкоплавкого компонента и его оксидов, образующихся в процессе переноса с анода, благодаря чему получается нанокомпозит, обладающий высокой износостойкостью.

Установлено, что в относительно «мягких» условиях трения (невысокая нагрузка при относительно низкой скорости) определяющую роль в повышении износостойкости таких покрытий играют микро - и нанонити из оксидов олова, а в условиях «жестких» испытаний (высокая нагрузка и высокая скорость) роль микро - и нанонитей

нивелируется, и определяющую роль играет обработанная методом электроискрового легирования матрица.

Показана возможность получения на алюминиевых сплавах методом электроискрового легирования покрытий повышенной толщины с периодическим нанесением «барьерных слоёв».

Установлено, что в качестве «барьерного слоя» наилучшими свойствами обладает сплав Al-Ni, позволяющий получать покрытия толщиной до $2 \cdot 10^{-3}$ м. По результатам исследования разработана технология восстановления геометрической формы изношенных алюминиевых деталей.

Решенная научная проблема: Доказана возможность получения с использованием электроискрового легирования на Al сплавах покрытий повышенной толщины, что является следствием образования в процессе электроискрового легирования обрабатываемыми электродами из сплава Al с легкоплавким компонентом (Sn, Pb) микро- и нанонитей легкоплавкого компонента и его оксидов. Разработана технология ремонта и восстановления алюминиевых деталей на этой основе.

Теоретическая значимость работы: полученные результаты можно рассматривать как новый способ получения микро- и нанонитей в покрытии, а также как основу для дальнейшей разработки получения наноструктурированных износостойких поверхностей.

Практическая значимость работы: результаты исследования могут быть положены в основу получения износостойких покрытий поверхностей из алюминиевых сплавов как с приращением изношенного слоя, так и без него, путем электроискрового легирования обрабатывающим электродом из сплава Al-Sn (АО20-1). Одним из многочисленных примеров практического использования результатов исследования может являться эффективное, экологически чистое и экономически недорогое восстановление изношенных посадочных мест под подшипники алюминиевых корпусов генераторов, насосов и других алюминиевых изделий.

Результаты исследований используются в Инженерно-техническом институте ПГУ им.Т.Г. Шевченко при чтении курсов «Основы электрохимических и электрофизических технологий», а также при выполнении дипломных работ и магистерских диссертаций.

Кроме того, на основании результатов исследований была разработана технология ремонта посадочных мест под подшипники для корпусных деталей автотракторной

техники из алюминиевых сплавов и внедрена на предприятиях ДООО «Молдавизолит РиО», ООО ПКП «Современные технологии», ООО «Торговый проект» в г.Тирасполь.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследований.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании современных физико-химических методов исследования, отсутствия противоречия полученных результатов с имеющимся в литературе и воспроизводимости экспериментальных данных в пределах точности использованных методов. Выводы, сделанные по результатам работы, а также научные положения аргументированы и прошли апробацию на научных конференциях, а так же при публикации материалов в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора. С 2008 г. автор являлся исполнителем ряда тем исследований, а также научным руководителем дипломных работ студентов, результаты которых вошли в диссертационную работу. Автором совместно с научным руководителем поставлены цели и задачи исследования, проведен анализ литературных данных по теме диссертации. Экспериментальные результаты, а также теоретические обобщения и расчеты, представленные в работе, выполнены под руководством научного руководителя или лично автором, а также при участии соавторов публикаций.

На защиту выносятся:

- установленные взаимосвязи между составами электродов, режимами обработки и свойствами поверхности алюминиевых сплавов, подвергаемых электроискровому легированию обрабатывающими электродами из сплавов Al-Sn и Al-Pb с образованием микро – и наноструктурированных покрытий.;
- разработанные рекомендации по применению процесса электроискрового легирования для получения упрочняющих покрытий на алюминиевых сплавах, включающих выбор режима, химического состава электродов и скорости обработки.
- технологии получения покрытий на алюминиевых сплавах с приращением толщины слоя и использованием эффекта модифицирования поверхности в условиях электроискрового легирования при механизированном нанесении покрытий;
- результаты внедрения разработанных технологий для восстановления посадочных мест под подшипники в алюминиевых деталях и ремонта радиаторов из алюминиевых сплавов.

Апробация работы:

Результаты работы докладывались и обсуждались на 9 международных конференциях:

1. III Международная научно -техническая конференция «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей» Россия, г. Кострома 15-17 февраля 2010 .
2. International conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering German-Moldovan Workshop on Novel Nanomaterials for Electronic, Photonic and Biomedical Applications Proceedings с. 227-230 Chisinau, Moldova April 18-20, 2013.
3. Международная объединенная конференция:
IV конференция "Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей";
V конференция "Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии" Россия, г. Плёс 16-20 сентября 2013.
4. BALTTTRIB 2013. VII International Scientific Conference 14-15 November 2013.
5. IX МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин» Россия, г. Москва 11-12 декабря 2013.
6. Международная научно-техническая конференция «Программа модернизации инженерно- технологического обслуживания АПК как основа промышленной и образовательной политики». Россия, г. Москва 20-21 ноября 2014 г.
- 7.Международная конференция MSCMP. Молдова, Кишинев, 16-19 сентября 2014 г..
8. 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering (ICNBME-2015). Chisinau, Republic of Moldova 23-26 September 2015 г..
9. Международный научно-практический симпозиум «Достижения и перспективы в агроинженерии и автотранспорте». Кишинев 11-13 ноября 2015 г.

Кроме того результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях профессорско-преподавательского состава ПГУ им. Т.Г.Шевченко в 2012, 2013, 2014, 2015 годах.

Публикации. Содержание диссертационной работы изложено в 15 печатных работах, включающих 6 статей, в том числе 4 в ведущих рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 139 страницах, содержит 54 рисунка, 29 таблиц и состоит из 5 глав с выводами, включает введение, обзор литературы, методику исследований, экспериментальную часть, основные выводы работы, список цитируемой литературы из 188 наименования и приложений на 19 страницах.

Введение

Обоснована актуальность работы, определены цель работы, научная новизна и практическая значимость исследования.

Глава 1. Анализ ситуации в области технологии получения электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах и их использование при ремонте деталей машин.

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 и видов обрабатывающих электродов, а также способов их получения. Рассмотрены физико-химические закономерности формирования покрытий на алюминиевых сплавах с помощью электроискрового легирования. Произведены выбор и постановка задач исследования.

Глава 2. Методические особенности технологии получения , исследования состава и свойств электроискровых покрытий . Оборудование и материалы.

Приведены характеристики экспериментального оборудования, методики получения обрабатывающих электродов, методики ручного и механизированного нанесения электроискровых покрытий, методики трибологических испытаний полученных образцов, а так же анализа поверхностей.

Глава 3. Технология получения электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах электродами из сплава Al-Sn.

Описаны эксперименты по получению покрытий на сплавах Д1 при электроискровом легировании в ручном и механизированном режимах, определены состав и морфология полученных покрытий,

Глава 4. Физико – механические свойства поверхностного слоя алюминиевого сплава, полученного электроискровым легированием электродами Al-Sn.

Приведены результаты трибологических испытаний, определены механические свойства покрытий полученных при различных режимах нанесения. Изложен механизм образования микро-и нанонитей в покрытии. Описаны процессы изменения состава

обрабатывающих электродов из сплава Al-Sn в процессе электроискрового легирования алюминиевых сплавов.

Глава 5. Разработка технологий получения покрытий на деталях из алюминиевых сплавов методом электроискрового легирования.

Приведены технология ремонта посадочных мест подшипников в корпусах из алюминиевых сплавов методом электроискрового легирования и технология ремонта автотракторных радиаторов методом пайки дефектных трубок с использованием электроискрового легирования. Кроме того рассмотрен метод применения электроискрового легирования с использованием электродов из сплава Al-Sn для создания и восстановления абразивного инструмента.

1. АНАЛИЗ СИТУАЦИИ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ РЕМОНТЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1 Применение деталей из алюминиевых сплавов в машиностроении

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 применяются десятки наименований деталей из алюминиевых сплавов [3]: 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(трубы 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, штампуются, хорошо обрабатываются резанием [5]. При этом сырьевые ресурсы для производства алюминия практически неограниченны, так как он является самым распространенным металлом в природе [6]. 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 [8]. 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 [9]. Для повышения износостойкости деталей получают все большее развитие высокоэнергетические технологии нанесения покрытий, использующие высококонцентрированные источники энергии [11]. Применительно к алюминиевым сплавам - это упрочнение поверхностей ионной имплантацией кислородом [12], электроискровым легированием [14,45], ионно-плазменным напылением [17], микродуговым оксидированием [18], излучением ОКГ [20], оксидированием в плазме тлеющего разряда [21], анодированием [22] 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, энергоёмкости 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, твёрдость, 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, аргонно-дуговая наплавка.

Ионная имплантация кислородом [12] 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 [12]. Оксидирование в плазме тлеющего разряда [21] 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 [22] 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) [18] и электроискровое легирование [14,40]. Оба способа относятся к группе упрочняющих методов обработки поверхности, основанных на воздействии

высококонцентрированных потоков энергии на поверхность детали, что приводит к значительному повышению износостойкости деталей [14,18].

Сущность метода МДО [23] 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 [18]. 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 [18]:

- 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 [18]:

- 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 [10,14,35,45] заключается в явлении электрической эрозии и полярном переносе материала анода (обрабатываемого 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 [24-32,34].

В настоящее время из всех перечисленных методов поверхностного упрочнения по ряду параметров самым эффективным является электроискровое легирование [14,45], 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 ($R_a \approx 20 \text{ мкм}$);
- малая толщина получаемого покрытия ($t \leq 0,2 \text{ мм}$) [171].

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 нанопокровов [37,39] или наноструктурированию их поверхностей [38], 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 [40]. В связи с этим можно предположить, что формирование покрытий с участием наночастиц на алюминиевые детали приведет к значительному повышению их износостойкости [13,59,85,93].

В гораздо меньшей степени исследован процесс получения нанопокровов и наноструктурирования поверхности алюминиевых сплавов, в частности, алюминий-медных сплавов типа дуралюминов, которые широко применяются в промышленности [14,45]. В основном ведутся исследования свойств поверхностных слоев алюминиевых сплавов при введении в них нанопорошков способом электроискрового легирования [39,42,44,59] При электроискровом легировании поверхности литых деталей из алюминий-медных сплавов

- 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 [44,85,95]. 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 [10,30,41]. 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.) [10,14]. 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 разнонаправлено. 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 [10,24-32,34,107], Б.Н.Золотых [108,109], А.Е. Гитлевича и В.В Михайлова [42, 45,46, 57,72,144, 147], Рыбалко А.В.[15,138,152], Л.С. Палатника [70], Г.В. Самсонова [111,112],

А.Д. Верхотурова [43,80, 113-118], , Г.П. Иванова [47], В. И. Иванова [48,126,177], Е.А. Левашова и др.[7,13,61,63,90,91,93-95,104], И.А. Подчерняевой [80,116-118], С.В. Николенко [37-39,43, 119,120], Ю.И. Мулина [121,122], Ф.Х.Бурумкулова [14,49,124÷127] П.А.Топала [153,157] и других.

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 [10] 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 [10]. 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 электроискрового 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 электроискрового легирования [118].

Модель А.Д. Верхотурова [118]. отличается от модели Лазаренко Б.Р. и Лазаренко Н.И. учетом явлений, происходящих в поверхностных слоях анода и катода [120]:

- 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 микрованны, в которой 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 [128], в жидкой и газовой фазе одновременно [130,138,139,141,142]. Но кроме того исследования показывают, что перенос может происходить в твердой фазе в результате хрупкого разрушения материалов электродов [11]. В некоторых случаях экспериментально наблюдалась зависимость эрозионной стойкости от физико-химических свойств материала [70,145,146] (температуры плавления, кипения, теплоты сублимации), а также сил межатомной связи (модуль упругости). Предпринимались неоднократные попытки установить связь эрозии с одним из указанных свойств [108,137,149], либо с их комплексом [128,145,151]. 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 $(2 \div 7) \cdot 10^6$ Па, температура нагрева поверхностных микрообъемов достигает $(5 \div 7) \cdot 10^3$ 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 [108,132]. В начальной стадии развития этой модели электрическая эрозия обуславливалась действием электромагнитных сил механического характера [108,132]. Особенностью этой модели является передача энергии электродам с помощью факела импульсного разряда [108]. 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 [108]. 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 [135], что причиной выброса вещества в межэлектродное пространство является быстросзатухающая 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 электроискровом 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 [14,45]. 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 [30], 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 [154.] (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 [154÷156]. При действии единичного искрового разряда на поверхности металла в области эрозионного кратера возникают три зоны [134]: 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 (10^8 1/см²); зона, в которой твердость повышается на величину от 50 до 400 МПа (глубина $\sim 150\div 200$ мкм).

1.5. Режимы процесса электроискрового легирования

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

Все процессы, обуславливающие электроискровую 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 [14 45]:

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

Модель процесса электроискровой 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 получают 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 [14,45], (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 ($R_a \approx 10 \text{ мкм}$) 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 [41,58,60,61,63,65-67,69,74,75], появившиеся в последнее время.

1.6. Новые технологии электроискрового легирования.

Обзор последних достижений в области электроискрового легирования металлов и сплавов показал, что все новые технологии электроискрового легирования условно можно разделить на четыре группы:

1. электроискровое легирование в гетерогенных средах.
2. электроискровое легирование электродами с обмазкой.
3. электроискровое легирование порошковыми электродами.
4. термореакционное электроискровое легирование.

Способ электроискрового легирования в гетерогенных средах [58] состоит в том, что наносимый материал в мелкодисперсном, взвешенном в газе состоянии, попадает в промежуток между электродом (анодом) и деталью (катодом). В промежутке возбуждаются высоковольтные разряды с частотой около 2000 Гц, в результате чего порошок плавится и осаждается на обрабатываемой поверхности, образуя покрытие с заданными свойствами. Преимущество способа - получение покрытия с более равномерной структурой поверхности. Однако способ сложен как в технологическом, так и в аппаратном оформлении. В связи с ограниченной номенклатурой выпускаемых порошков для электроискрового легирования, возникают сложности получения порошка соответствующего состава и дисперсности. Кроме того, получение взвеси порошка в газе, также непростая задача, требующая наличия специальной аппаратуры и технологии.

Новое направление в технологии электроискрового легирования предлагается Л.С.Богинским и др. [59,65,66], который использует электроды для электроискрового легирования с обмазками, изготовленными, в том числе, с использованием технологии сухого изостатического прессования (СИП) и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Применение обмазок электродов является перспективным направлением развития способа электроискрового легирования, так как позволяет не только изменять химический состав наплавляемого слоя и защищать

наплавляемую поверхность от воздействия окружающей среды, но и регулировать его температуру за счет снижения или повышения теплопроводности обмазки. Это может привести к улучшению качества поверхности обрабатываемой детали и увеличивать толщину покрытия. К тому же если подобрать состав обмазки таким образом, что при электроискровом легировании будет выделяться достаточное количество CO_2 , то можно ожидать увеличение слоя покрытия в несколько раз [67].

В работе Гнесина П.К. [69] произведено исследование способов получения покрытий с помощью электроискрового легирования электродами из силицидов молибдена и вольфрама и их использования для различных практических применений. Такие покрытия являются исключительно износостойкими при высоких температурах, в том числе и в окислительных средах. Однако разработанные силицидные покрытия, предназначены только для стальных поверхностей, поэтому возможность применения силицидных покрытий на алюминиевых поверхностях требует дополнительного изучения.

Левашовым Е.А. и др. (научно-учебный центр СВС МИСИС) [13,61,63,90,91,93-95] были исследованы новые электродные материалы для электроискрового легирования. Широко применяемые в настоящее время в качестве электродных материалов твердые сплавы марок ВК и ТК имеют высокую эрозионную стойкость, низкий коэффициент переноса и высокую стоимость из-за наличия вольфрама и кобальта. Поэтому такие твердые сплавы не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электродным материалам. Ввиду этого предпринята попытка разработать электродные материалы на безвольфрамовой основе. Материалы получают с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и модифицируют их нанокристаллическими добавками. Исследование показали, что введение нанокристаллических добавок в электродный материал снижает скорость износа образцов с 80 мкм/с до 48 мкм/с, причем увеличение износостойкости электроискровых покрытий наблюдалось как на титанобороалюминиевых, так и на титанохромовых карбидных покрытиях. Это объясняется увеличением микротвердости до величины 20,7 ГПа. Установлена повышенная концентрация наночастиц в поверхностном слое покрытия, полученного с помощью электроискрового легирования, по сравнению с границей раздела подложка-покрытие.

Рассматривая указанные выше способы, можно сделать заключение, что технология их использования весьма специфична, и предназначена для определённого круга деталей, в основном изготавливаемых из тугоплавких сплавов (сталь, чугун, титан и др.). О применении этих способов электроискрового легирования для легкоплавких сплавов, в частности алюминиевых, сведений в литературе не имеется.

Анализ указанных выше новых технологий позволяет выявить интересную тенденцию развития электроискрового легирования, а именно – большинство новых технологий ориентированы на применение либо порошковых материалов с мелкодисперсными частицами, либо сплавов в виде композиционных материалов, содержащих основную матрицу и различные включения в ней частиц нанометрового размера. Это соответствует общему направлению развития металлообрабатывающих технологий в мире. По отношению к электродам для электроискрового легирования направление развития выглядит следующим образом: применение сплошных электродов – трубчатых электродов – составных электродов из проволок – порошковых электродов – электродов из материалов на молекулярном и атомарном уровне (жидких, пылевидных, в том числе и композиционных- с вкраплениями нано частиц в матрице).

1.7. Обработывающие 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. [16,49,51,68]

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 [77] и литьё под давлением [79].

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. [81]. 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. Достоинством способа является высокая производительность и возможность получать

электроды нужного диаметра ($1 \div 10$ мм) 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 твердостью. Уменьшение размера зерен металлов с 10 мкм до 10 нанометров дает повышение прочности в 30 раз [84]. 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 $\sigma_{\epsilon}=800$ МПа, что в 2 раза превышает прочность самого прочного литого алюминиевого сплава состава Al-Zn [84]. При высокоскоростной деформации алюминиевого сплава с наноструктурой получено рекордное значение сверхпластичности: относительное удлинение достигло величины ~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 [85, 90, 91] 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, 39, 43]. Николенко С.В. исследовал 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 35.

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 [90,93,94,105] 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 микротвёрдости 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.

1.8 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 ($\sim 2500^{\circ}\text{C}$);
- 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 ($\sim 0,5$ мм и более) зависит от многих причин: энергии импульса, состава окружающей среды, химического состава и физических свойств обоих электродов и т.д. Известно [33], 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 [33,112] физическая модель ограничения толщины формируемого слоя покрытия при электроискровом легировании. Рост слоя сопровождается накоплением в нем остаточных напряжений и изменением физико-химических и механических свойств обрабатываемой поверхности. При электроискровом 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 электроискрового 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 электроискрового 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 [150], в которой получен слой покрытия около 1мм (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 [147] 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 [19]. 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 $T_{пл} < T_{пл} \text{ алюминия}$. Легирование же элементами с $T_{пл} > T_{пл} \text{ алюминия}$ 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 [147]. 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 [147], 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^{-5} с., 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 [144] на распределение элементов Ti, Ni и Cr в покрытии при электроискровом 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 электроискровом легировании Sn и Pb одноименными электродами на образцах покрытия как такового не образуется [73], так как вес катода постоянно уменьшается. О каком либо модифицировании поверхности не сообщается. В результате эксперимента сделан вывод, что при электроискровом 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 [140], чтобы процессы на электродах носили резко ассиметричный 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» [140]. 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 электроискрового 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 [47]. 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 $R_a=6,3\div3,2\text{мкм}$. 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.

1.9. Особенности свойств наноматериалов

Под термином «нанотехнология» в настоящее время понимают создание и использование материалов, устройств и систем, структура которых реализуется в нанометровом масштабе, т.е. в диапазоне размеров молекул и кластеров атомов. С точки зрения инженерии поверхностей нанотехнология включает отображение, измерение, моделирование и манипулирование материей в нанометровом диапазоне размеров, в

котором различные уникальные свойства наночастиц способны обеспечить появление новых свойств материалов и их новые применения.

К объектам нанотехнологии относятся как квантовые точки (нульмерные объекты), так и одно- и двумерные образования (индивидуальные частицы, волокна, трубки, плёнки, нити и т.д.). Кроме того, к таким объектам относятся и наноструктурные материалы объёмного типа, состоящие из наночастиц. Такие крупные объёмные структуры, состоящие из наночастиц, являются полностью искусственными образованиями и характеризуются, как правило, новыми физическими и химическими свойствами.

Наноинженерия, которая в последнее время интенсивно развивается, занимается поиском эффективных методов использования наноструктурных материалов. Широкий интерес к наноинженерии, и, в частности, к нанотехнологиям, объясняется тем, что с их помощью исследователи и практики надеются получить новые материалы с характеристиками, в разы превосходящие их современный уровень. Такие материалы нужны современному машиностроению, так как дальнейшее развитие многих отраслей техники связано с ограничениями по технологическим параметрам (допускаемые напряжения, давление, температура и т.д.) из-за недостаточно высоких свойств существующих материалов. Углеродные нанотрубки, полученные с помощью нанотехнологии, на порядок прочнее стали [50], при этом удельный вес этих трубок в шесть раз меньше, чем стальных при одинаковых размерах. По установившемуся мнению экспертов, наноматериалами считаются такие материалы, которые содержат структурные элементы, имеющие хотя бы в одном измерении размеры порядка 100 нм и менее, обладающие качественно новыми свойствами, а также новыми эксплуатационными характеристиками. Так как наноматериалы являются полностью искусственными и получаются из частиц нанометрового размера, то с целью получения объёмных материалов они требуют дальнейшей обработки, то есть добавления других материалов, компактирования и т.д. Особенностью наноматериалов как раз и является то, что кроме получения наночастиц, необходимы дополнительные затраты для получения материала, соответствующего своему целевому назначению.

В том случае, когда размеры частиц находятся в нанометровом диапазоне, возникают качественно новые эффекты, свойства и процессы, определяемые законами квантовой механики, отношением поверхность/объём и другими явлениями. Таким образом, свойства кристаллических наноматериалов определяются размерами отдельных зёрен, свойствами граничного слоя, коллективным взаимодействием основных составляющих структуры с поверхностными слоями частиц.

Реализовать уникальные свойства наноструктурных материалов можно путём производства нанопорошков с последующим их компактированием в объёмные изделия различными способами. Нанопорошки имеют громадную удельную поверхность, что и придаёт им уникальные свойства. Так, например, при диаметре частиц 100 нм площадь поверхности достигает $30 \text{ м}^2/\text{г.}$, в связи с чем повышаются практически все механические и физические свойства изделий с наноструктурированным строением. Твёрдость у нанокристаллических материалов в 2-7 раз выше, чем у материалов с макрокристаллическим объёмным строением, а модуль упругости на 30% ниже.

В результате исследований на наноматериалах разного химического состава было установлено, что при достижении размеров зерна менее 10 нм твёрдость их снижается. Объяснением этого явления служит установленный факт увеличения подвижности пограничных слоёв (так называемое «зернограничное проскальзывание»). Однако, несмотря на понижение твёрдости, она в несколько раз превышает твёрдость объёмных материалов того же химического состава.

Наноматериалы отличаются повышенной прочностью: предел текучести в 2-3 раза, а предел прочности может превышать предел прочности обычных объёмных материалов в $1,5 \div 8$ раз [44].

Ещё одной особенностью нанокристаллических материалов является высокая демпфирующая способность, которая объясняется рассеиванием упругих колебаний в результате различия модулей упругости, как самих зёрен, так и их границ.

Повышение прочности наноматериалов отмечается не только у металлов и сплавов, но и у неметаллических материалов, имеющих нанокристаллическое строение. Так нитевидные монокристаллы (усы) и поликристаллы из графита показывают очень высокий предел прочности, близкий к теоретическому. Усы графита превышают прочность стальной рояльной проволоки в 10 раз [81].

Исследования свойств наноструктурных материалов, проведённые в МИСИС [84] (г. Москва), показали следующие результаты: при уменьшении размера зёрен до нанометрового диапазона изменяется период кристаллической решётки. Так при уменьшении размера частиц с 20 нм до 6 нм период решётки уменьшается на 1,5%, что влечёт за собой изменение свойств.

Наноструктурные металлы и сплавы, кроме того, обладают высокой коррозионной стойкостью. Так, углеродистые стали в наноструктурном состоянии превышают по коррозионной стойкости нержавеющие стали с макроскопической структурой [53].

В связи с наличием у наноматериалов таких свойств, как прочность, твёрдость, пластичность и т.д., возникает вопрос об их практическом использовании. История показывает, что отличие свойств нано- и ультра- мелких частиц от свойств массивного объёмного материала известно уже давно и также давно используется в разных областях техники: это и аэрозоли, и красящие пигменты, и получение цветных стёкол с помощью микродобавок и т.д. В авиации наноразмерные частицы применяются для создания радиопоглощающих покрытий самолётов. Нитевидные усы из графита и их современный аналог - фулериты и фуллерены - уже используются для изготовления композитных материалов исключительно высокой прочности и пластичности при низкой плотности. Из-за высокой стоимости эти наноматериалы применяются пока только в космической, ракетной и авиационной технике, но намечается их использование в автомобильной (кузова из карбона) и даже бытовой (велосипедные рамы) промышленности. В зависимости от морфологии и физических свойств, все наноматериалы можно разделить на 5 групп (таблица 1.1).

Анализ рынка нанотехнологий показал [44], что сферой масштабного приложения нанотехнологий, наряду с медициной и микроэлектроникой, является обрабатывающая промышленность. Наибольшее распространение получают следующие категории наноматериалов:

- нанокompозиты: в металлообрабатывающей, автомобильной, авиационной и космической промышленности;
- нанокompозиты во всякого рода покрытиях, в том числе на режущих, мерительных и других инструментах, а также в покрытиях трущихся деталей.

Таким образом, в металлообработке из пяти категорий наноматериалов наибольшее применение получила категория нанокompозиты, причём наноматериалы используются преимущественно в покрытиях, как на режущих инструментах, так и на трущихся поверхностях деталей.

Таблица 1.1

Основные категории наноматериалов

№ п/п	Тип наноматериала	Определение
1	2	3
1	Твёрдые наночастицы.	Сверхмелкие твёрдые частицы наноразмерные, включая нанокристаллы и нанопорошки
2	Нанотрубки и другие полые наночастицы.	Полые частицы наноразмера, включая нанотрубки, а также другие виды полых частиц (нанокапсулы, нанорожки и др.)
3	Наноразмерные плёнки	Покрывтия, толщина которых находится в наноразмерном диапазоне и являются нанокристаллическими или проявляют квантовые свойства
4	Наноструктурные монолитные материалы.	Объёмные твёрдые тела, внутренняя структура которых является наноразмерной.
5	Наноккомпозиты	Смесь из двух или более разнородных компонентов, по меньшей мере, один из которых имеет наноразмеры.

Можно предположить, что для значительного повышения износостойкости алюминиевых сплавов путём получения на их поверхности покрытий, необходимо также вводить в состав покрытий наночастицы в том или ином виде. При применении для этой цели электроискрового легирования частицы могут вводиться путём использования электродов с добавками нанопорошков или нановолокон. Для этого необходимо изучить свойства наноматериалов (в виде порошков, волокон, кластеров и т.д.) и подобрать или изготовить подходящие нанопорошки для получения соответствующих электродов.

Для получения таких электродов можно использовать следующие категории материалов:

- объёмные материалы с размерами в несколько миллиметров, но при этом они должны состоять из наноструктурных элементов с размером зерна нанометрового диапазона;
- композитные наноструктурированные материалы, содержащие в основной матрице включения наночастиц любой формы, в том числе и те, размеры которых хотя бы по одной координате были в нанометровом диапазоне размеров.

Для использования наноматериалов в обычных условиях, например, с целью повышения износостойкости алюминиевых сплавов, можно воспользоваться другим свойством этих материалов - подшихтовкой их к обычным порошковым материалам при изготовлении различных изделий методом порошковой металлургии. Исследованиями установлено [44], что даже при небольших добавках нанопорошков в количестве 1-5% по объёму свойства порошковых сталей значительно меняются. Так добавка 6% нанопорошка в шихту стали X12H2 позволила получить увеличение твёрдости и ударной вязкости почти в 1,5 раза.

Из особенностей свойств наноматериалов можно сделать некоторые выводы :

1. Наноматериалы обладают повышенной прочностью, твердостью, износостойкостью и ударной вязкостью, причем указанные параметры могут превышать параметры обычных материалов того же химического состава в 2÷5 и более раз.
2. Для улучшения свойств алюминиевых сплавов, в частности, износостойкости, целесообразно в покрытия вводить наноматериалы в любом виде (нанокристаллических частиц, кластеров или нановолокон). При этом необязательно иметь покрытия сплошь из наноматериалов, достаточно иметь композиционное покрытие, состоящее из алюминиевой матрицы и включений каких-либо наночастиц в количестве 5÷10% от массы покрытия.
3. Для введения в покрытия наноматериалов с помощью электроискрового легирования алюминиевых сплавов с целью повышения их износостойкости необходимо применить электроды – аноды с наноструктурой. Это могут быть порошковые электроды с добавками наночастиц в виде порошков, или литые электроды с гетерофазной структурой, в которых включения второй фазы имеют нанометровую размерность или близкую к ней.

1.10. Выводы и постановка задач исследования.

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.

Для достижения цели необходимо решить следующие научные задачи:

1. Выявить физические закономерности формирования износостойких покрытий в зависимости от параметров электроискровой обработки поверхностей из алюминиевых сплавов электродами, представляющими собой тугоплавкую матрицу с включениями легкоплавкого компонента.
2. В связи с необходимостью исследования влияния различных параметров электроискрового легирования на свойства получаемых поверхностей, как в условиях ручного так и механизированного нанесения покрытий, создать механизированную экспериментальную установку для электроискрового легирования, обеспечивающую стабильность режимов и разработать методику механизированного формирования покрытия.
3. Исследовать формирование поверхностного слоя при ручном и механизированном процессе электроискрового легирования алюминиевых сплавов электродами, представляющими собой тугоплавкую матрицу с включениями легкоплавкого компонента.
4. Исследовать макро- и микроструктуру, фазовый и химический состав покрытия и электродов, 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 (в масле, при сухом трении, в СОЖ).
6. В связи с необходимостью создания технологии электроискрового легирования алюминиевых поверхностей, применимую для восстановления и ремонта алюминиевых деталей разработать оптимальный технологический процесс получения износостойких покрытий при восстановлении с одновременным упрочнением деталей.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ , ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ . ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ.

2.1. Экспериментальное оборудование и режимы для электроискрового легирования

Для проведения исследований использовались установки для нанесения покрытий как в ручном, так и в механизированном режимах.

2.1.1. Оборудование для нанесения покрытия электроискрового легирования в ручном режиме.

Прибором для электроискровой обработки служила установка ALIER-31 (фирма SCINTI, Молдова) (рис.2.1.)



Рис.2.1. Установка для электроискрового легирования ALIER31.

Установка ALIER-31 для электроискрового легирования имеет мощность - $W = 0,25$ кВт - и предназначена для формирования электроискровых покрытий самых различных видов [171]. Несмотря на небольшую мощность, установка обладает широкими технологическими возможностями (табл. 2.1.).

Таблица 2.1.

Параметры покрытия, получаемого на установке ALIER-31

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
5	0,09	40	6,0
6	0,12	50	6,0
7	0,2	100	6,0

Особенностью этой установки является компактность, малые габариты, небольшая потребляемая мощность, но при этом широкий диапазон регулирования параметров: энергии и частоты импульсов, а также амплитуды вибрации (табл.2.2).

Таблица 2.2.

Параметры технологических импульсов генератора установки ALIER-31

Режим	Длительность импульса, мкс	Амплитуда импульса тока, А	Энергия импульса, Дж
1	16	125	0,036
2	31	125	0,07
3	62	175	0,20
4	125	175	0,39
5	250	175	0,79
6	500	175	1,58
7	1000	175	3,15

Другой особенностью установки является то, что частота генерируемых импульсов непосредственно не связана с частотой вибрации обрабатывающего электрода, а задается независимо. При этом частота зависит от энергии в импульсе.

2.1.2. Установка для нанесения покрытий методом электроискрового легирования в механизированном режиме.

Для осуществления процесса электроискрового легирования при более высоком уровне контроля технологических параметров (в числовом виде) была разработана

специальная экспериментальная установка (рис.2.2, 2.3). Установка обеспечивала двухкоординатную вибрацию обрабатывающего электрода, причем поперечная вибрация задавала ширину «дорожки» при механизированном формировании покрытий с широким диапазоном регулирования параметров технологического процесса.

Стандартный вибровозбудитель 2 установки ALIER-31 был закреплен на вертикальной головке фрезерного станка таким образом, что он мог совершать осциллирующие колебания с регулируемой амплитудой и частотой в направлении, перпендикулярном движению суппорта 5, на котором с помощью винтов крепился образец 4. Амплитуда обеспечивалась специальным эксцентриком, укрепленным на вертикальном шпинделе станка с возможностью регулировки его вылета от $(1 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м. Это давало возможность получать на образце «дорожку» покрытия разной ширины. Частота поперечной вибрации обеспечивалась скоростью вращения вертикального шпинделя, которая тоже регулировалась от 20 до 150 об/мин. Приводом шпинделя служил электродвигатель 6 постоянного тока, подключённый к лабораторному автотрансформатору через диодный мост, что давало возможность не только регулировать частоту поперечной вибрации, но и контролировать её с помощью вольтметра.

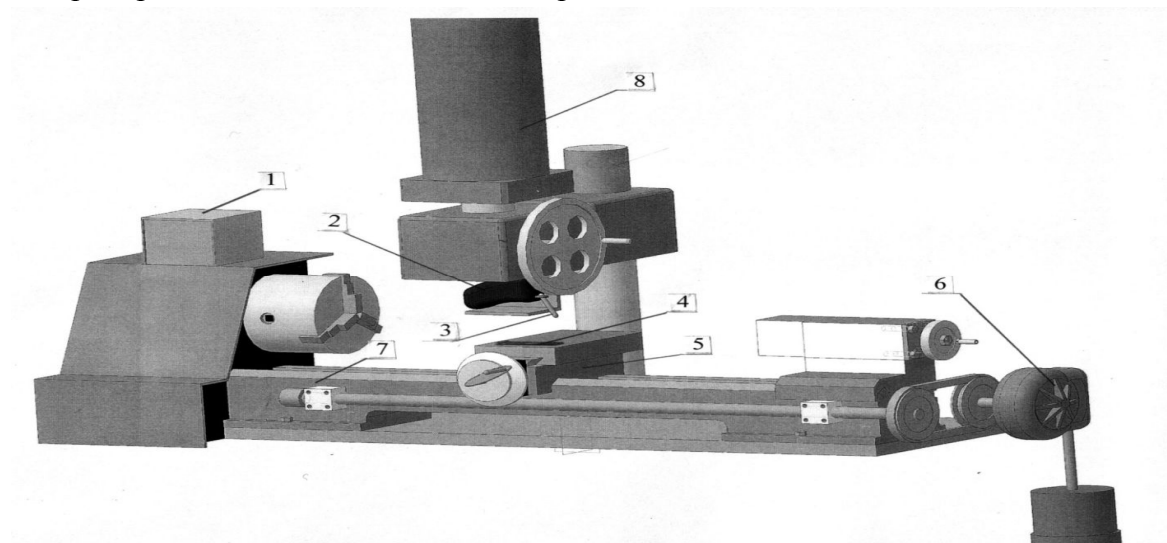


Рис.2.2 Модель экспериментальной установки электроискрового легирования для механизированного формирования покрытий. 1-ALIER 31; 2-вибровозбудитель; 3-4-образец; 5-суппорт установки; 6-регулируемый привод суппорта; 7-станина установки; 8-регулируемый привод поперечного вибратора.



Рис 2.3. Экспериментальная установка электроискрового легирования для механизированного формирования покрытий.

Образец 4 с помощью винтов крепился на горизонтальном суппорте 5 установки. Для его перемещения был изготовлен специальный привод 6 (электродвигатель постоянного тока, оснащённый понижающим редуктором), который обеспечивал возможность регулирования скорости от $(0,3 \div 2) \cdot 10^{-3}$ м/с. Двигатель подключался к сети через лабораторный автотрансформатор и диодный мост, выходное напряжение контролировалось вольтметром.

Кроме указанных параметров (скорости перемещения образца, амплитуды и частоты поперечных колебаний вибратора) сама установка ALIER-31 обеспечивала возможность изменения еще нескольких параметров: режима в диапазоне $1 \div 7$, коэффициента энергии $0 \div 1$ и амплитуды вибрации электрода $0 \div 1$. Таким образом, экспериментальная установка обеспечивала при механизированном (а значит, стабилизированном по параметрам) нанесении покрытия возможность широкого изменения режимов по 6 параметрам.

Экспериментальная установка была разработана с целью определения режимов работы, способствующих наиболее эффективному нанесению покрытий на алюминиевые сплавы (типа Д1) с улучшенными эксплуатационными свойствами.

2.2. Методика получения обрабатывающих электродов и изготовление технологических образцов.

В качестве обрабатывающих электродов использовались стержни диаметром от $2 \cdot 10^{-3}$ м до $8 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $50 \cdot 10^{-3}$ м, отлитые из антифрикционного сплава Al-Sn (АО20-1). Согласно ГОСТ 14113-78 сплав содержит [158] $17 \div 23\%$ Sn; $0,7 \div 1,2\%$ Cu; $0,02 \div 0,2\%$ Ti; остальное—алюминий.

Обрабатывающие электроды из алюминиевого сплава Al-Sn изготавливались по следующей методике.

Сплав заданного химического состава расплавлялся в графитовом тигле, установленном в индукторе высокочастотной установки ВЧИ-10У (рис. 2.4), а затем разливался в специально изготовленный кокиль (рис. 2.5), в котором получались стержни размером $\varnothing 8 \times 50 \times 10^{-3}$ м. Обрабатывающие электроды $\varnothing 2 \times 10^{-3}$ м и $\varnothing 4 \times 10^{-3}$ м отливались на центробежной машине с вертикальной осью вращения в специальную изложницу.



Рис 2.4 Индуктор высокочастотной установки ВЧИ-10У с тиглем для плавки алюминиевых сплавов



Рис 2.5. Кокиль для отливки обрабатывающих электродов из алюминиевого сплава.

Технология изготовления обрабатывающих электродов для электроискрового легирования содержала следующие операции:

- подготовка шихтовых материалов;
- плавка сплава в индукционной печи;
- разливка сплава в кокиль или заливка в изложницу центробежной машины;
- отрезка прибылей, очистка, обточка конца электрода на радиус.

Тугоплавкие элементы (Ti и Cu) вводились в расплав алюминия в виде промежуточных сплавов–лигатур (50%Al+50% Cu) и (90% Al+10%Ti), остальные элементы (Al и Sn) вводились в чистом виде. Расчет шихты [159] проводился на среднее содержание элементов (% масс.): Sn – 20; Cu – 1; Ti – 0,1; Al – остальное. Электроды из других алюминиевых сплавов (Al-Pb, Al-Ni, Al-Cu и др.) изготавливались по этой же методике.

Угар элементов во время плавки не учитывался, так как время расплавления сплава не превышало 50 сек. Емкость плавильного тигля -100г.

Состав шихты на 100г расплава Al-Sn (AO20-1) :

- 2г лигатуры Al - Cu состава 50%Al+50% Cu ;
- 1 г лигатуры Al - Ti состава 90% Al+10%Ti;
- 20г чистого Sn марки O1;
- 77г чистого Al марки A1.

Для предотвращения окисления на поверхность расплава наносился флюс (50% NaCl+50% KCl). Перед заливкой электродов в некоторых случаях кокиль окрашивался огнеупорной краской на основе окиси цинка и жидкого стекла (50%ZnO +5% жидкого стекла+45% воды). После покраски кокиль проходил сушку в электрической печи СНОЛ 2,5 при температуре 250°C, после чего сразу заливался расплавом непосредственно из графитового тигля. После затвердевания и охлаждения от стержней отделялась прибыль, стержни очищались от краски абразивной бумагой, а конец стержней затачивался с радиусом при вершине $\approx (2\div 4) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Для изучения состава электродов в процессе изготовления был проведен ряд экспериментов с определением элементного состава (EDX).

Исследовались исходные образцы обрабатывающих электродов, не участвовавших в процессе электроискрового легирования. Результаты исследования по длине электродов (табл. 2.4.) показали:

Таблица 2.4.

Химический состав обрабатывающих электродов.

Состав (массовый, %)					Примечание
Al	Sn	Fe	O	Zn(Cu?)	
67,8	19,6	1,1	11,5	0,2	Исходный образец электрода (верх)
68,4	23,0	1,0	7,3	0,25	Исходный образец электрода (низ)

1. В исходных образцах обрабатывающих электродов содержание Al и Sn находятся в пределах, допускаемых ГОСТом, т.е. Al~68% , Sn~20%.

2. На поверхности электродов присутствует кислород в количестве ~ 9%, очевидно в виде оксидов SnO₂, Al₂O₃, т. к. поверхность алюминиевых сплавов всегда покрыта сплошной пленкой окислов.

3. Небольшое содержание Fe в электроде объясняется диффузионным переносом в результате контакта образцов при заливке с чугуновой поверхностью кокиля. В электроде наблюдается небольшая ликвация Sn: в нижней части электрода диаметром 8 мм Sn содержится в концентрации ~ 23 % , а в верхней 19%, т.е. в момент заливки более тяжелое олово ($\gamma=7,3 \text{ г/ см}^3$) опускается вниз, а более легкий алюминий ($\gamma=2,7 \text{ г/ см}^3$) поднимается вверх.

4. Наличие в образцах Zn может быть связано с использованием краски на основе окиси Zn. Так как следов Cu в образцах не обнаружено, то можно предположить, что это связано с погрешностью анализа.

Для формирования покрытий и последующего исследования их физико-механических свойств был разработан технологический образец (рис.2.6).

Образцы изготавливались фрезерованием из листа сплава Д1 (ГОСТ4784) [160] следующего состава: Cu $3,8 \div 4,8\%$; Mg $0,4 \div 0,8\%$; Mn $0,4 \div 0,8\%$; остальное - алюминий.



Рис.2.6 Технологический образец для проведения исследований.

Отверстия предназначались для крепления на механизированной установке электроискрового легирования и на установке для испытания на трение. Рабочая часть образца представляла собой пластину толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $5 \cdot 10^{-2}$ м, толщина образца $4 \cdot 10^{-3}$ м. Ребра по обеим сторонам образца сделаны специально для предотвращения коробления его при изготовлении и непосредственно в процессе формирования покрытия при электроискровом легировании. Другое назначение ребер - исключение «краевого эффекта» при электроискровом легировании, когда обрабатывающий электрод в процессе формирования покрытия выходит на край образца, возникает сильное искрение и унос материала с катода-образца.

Подготовка образца под покрытие заключалось 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 ВЛР200 с точностью до четвёртого знака, а затем нанесение покрытия и повторное взвешивание для определения изменения веса образца.

2.3 Технология нанесения электроискровых покрытий.

В настоящем исследовании использовался как ручной, так и механизированный режим формирования покрытий.

2.3.1 Методика нанесения покрытий в ручном режиме.

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

- для обеспечения единообразия и одинаковых условий проведения процесса электроискрового легирования технологические образцы применялись только одного размера и не проходили никакой специальной подготовки поверхности (мойки, обезжиривания и т.д.);
- скорость перемещения обрабатывающего электрода выбиралась такой, чтобы общее время обработки составляло ~ 4 мин/образец;
- электрод держался перпендикулярно по отношению к обрабатываемой поверхности. Допускался наклон не более $10\div 15^\circ$;
- рабочая часть электрода имела форму конуса с радиусом при вершине $2\div 4 \times 10^{-3}$ м.;
- при изнашивании конца электрода форма периодически восстанавливалась путем его правки ;
- скорость перемещения электрода поддерживалась равномерной. Покрытие наносилось полосами. Обрабатывающий электрод перемещался вручную круговыми движениями с перекрытием предыдущих слоев на 0,25 величины полосы ;
- 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;
- при нанесении покрытия вручную использовался только вибрирующий электрод с постоянной частотой вибрации (~ 100 Гц);
- использовались все 7 режимов работы установки ALIER-31. После оптимизации процесса электроискрового легирования были выбраны режимы 5 и 6, коэффициент энергии 0,8, амплитуда вибрации 0,5;
- покрытие наносилось на широкую поверхность технологического образца.

После нанесения покрытия ребра удалялись вручную путем опилования;

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.

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

Получение покрытий методом электроискрового легирования в ручном режиме для испытаний на износостойкость осуществляли двумя методами. Согласно первому 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. По второму методу покрытие наносилось сразу на всю поверхность образца в течение 1 мин, но затем поверх первого слоя наносилось еще 3, то есть общее время нанесения покрытия на весь образец составляло тоже 4 мин.

2.3.2 Методика механизированного нанесения покрытий с помощью электроискрового легирования.

Поверхность под механизированное покрытие готовили по той же методике, что и под покрытие при ручном режиме.

После подготовки образцы закреплялись на суппорте экспериментальной установки. В вибровозбудителе установки ALIER 31 закреплялся обрабатывающий электрод. На пультах управления экспериментальной установки выставлялись необходимые режимы работы: коэффициент энергии, амплитуда вибровозбудителя, режим, амплитуда и частота поперечной вибрации. После этого включалась установка и происходило механизированное нанесение покрытия за счёт движения суппорта вперёд-назад. Сразу после нанесения покрытия одного-двух слоёв образцы и электроды подвергались повторному взвешиванию, которое давало возможность определить в процессе обработки привес или унос материала образца или электрода.

Использовались два метода нанесения покрытий: при постоянном числе нанесенных слоев и различной скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно образца (метод 1) и "постоянной величине пропущенного заряда" или постоянном количестве энергии, вводимой в искровой промежуток за счет сохранения времени обработки образца постоянным (метод 2), также при различной скорости.

При использовании метода 1 постоянное число нанесенных слоев было равно четырем при различной скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно заготовки. Скорость перемещения образца изменялась от $(0,3 \div 2) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Осуществлялось четыре прохода обрабатывающего электрода с заданной скоростью по всей обрабатываемой поверхности образца.

При использовании метода 2 число наносимых слоев увеличивалось пропорционально увеличению скорости перемещения обрабатывающего электрода. В случае обработки по методу 2 наносилось разное количество слоев: 4 слоя - при скорости перемещения обрабатывающего электрода, равной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м/с и 16 слоёв при скорости перемещения, равной $2 \cdot 10^{-3}$ м/с. Соответственно при скоростях перемещения $1 \cdot 10^{-3}$ м/с и $1,5 \cdot 10^{-3}$ м/с наносилось 8 и 12 слоев.

По результатам взвешивания образцов определяли удельную скорость обработки G (мг/с.см^2), которая в зависимости от условий проведения процесса могла быть как положительной, так и отрицательной величиной. В последнем случае вес образца после обработки не увеличивался, а уменьшался. При расчете G использовалось общее время обработки, а также общая площадь модифицированной поверхности.

2.4 Методика исследования свойств поверхности покрытий и электродов.

Поверхность образцов (до и после обработки) с целью изучения морфологии и элементного состава исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп TESCAN с приставкой для элементного анализа поверхности INCA Energy EDX (Oxford, Великобритания))

Металлографическому анализу подвергались как обрабатывающие электроды, так и технологические образцы, из которых вырезались шлифы размером $(8 \times 8) \times 10^{-3}$ м. Металлографический анализ шлифов проводился на исследовательском металлографическом микроскопе МИМ10, 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.

Процесс изготовления шлифов для оптической микроскопии включал вырезку образца, шлифование, полирование и травление для выявления микроструктуры. Для травления алюминиевых образцов использовался следующий состав травителя: [161]

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

Время травления 3÷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.

Кроме оптической микроскопии, для выявления более тонких структур использовалась электронная микроскопия. Анализ проводился, как описано выше, с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN с приставкой для элементного анализа поверхности INCA Energy EDX (Oxford, Великобритания).

С помощью электронной микроскопии проводился морфологический анализ поверхности электродов-анодов и электродов-катодов, как до электроискровой обработки, так и после. Кроме того, с помощью электронной микроскопии изучалось появление в структуре микродисперсных частиц, их расположение и состав.

В качестве объектов для электронной микроскопии использовались образцы размером $(5 \times 5) \times 10^{-3}$ м, вырезанные из технологических образцов до и после электроискровой обработки. Для изучения морфологии покрытий предварительная обработка (полировка, травление и т.д.) не проводилась. С целью выявления тонкой микроструктуры из образцов $(5 \times 5) \times 10^{-3}$ м. были изготовлены шлифы по указанной выше методике. Состав отдельных фаз микроструктуры определялся с помощью приставки к электронному микроскопу INCA Energy EDX.

Рентгенофазовый анализ проводился с целью определения фазового состава покрытия (наличие оксидов, нитридов, интерметаллидов и т.д.). Для проведения рентгенофазового анализа использовалась установка ДРОН УМ1 (FeK_α - излучение, Mn фильтр, $\theta/2\theta$ метод). Расшифровка рентгенограмм производилась с помощью программы Match.

Шероховатость поверхности образцов по Ra и её профиль определялись с помощью профилографа-профилометра («Surtronic, Taylor Hobson, GB» Великобритания) (рис. 2.7.).



Рис.2.7.Измерение шероховатости образцов с помощью прибора Surtronic, Taylor Hobson.

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.

Для того чтобы повысить точность измерения и уменьшить время, необходимое для проведения испытания на микротвердость, была разработана программа для персонального компьютера, которая позволила автоматизировать все вычисления.

Для этого на твердомере ПМТ-3 была смонтирована WEB-камера (рис 2.8), позволяющая перенести изображение отпечатка на монитор компьютера с нужным увеличением. Эта методика измерения микротвердости покрытия на модернизированном приборе ПМТ-3

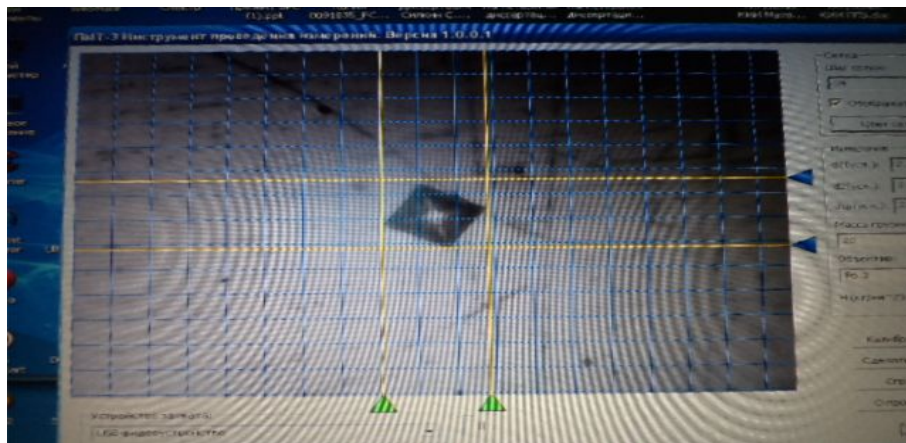


Рис.2.8.Процесс измерения микротвердости с помощью персонального компьютера.

2.5. Методика проведения трибологических испытаний образцов.

Тестовые испытания на износ полученных покрытий проводили на машинах трения:

- с возвратно-поступательным движением образца относительно контртела. (по методике Института прикладной физики Академии наук Молдовы [163]), (рис 2.9, 2.10);
- с вращательным движением по схеме «диск-колодка» (стандартная машина трения СМЦ-2) (рис 2.12, 2.13).

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. Контакт контртела с испытуемой поверхностью осуществлялся площадью 9×10^{-4} м² таким образом, что контртело располагалось перпендикулярно испытуемой поверхности. Длина рабочей поверхности образца, контактирующей с контртелом, составляла $48 \cdot 10^{-3}$ м.



Рис 2.9 Машина для проведения трибологических испытаний образцов.



Рис 2.10. Фрагмент системы контртело-образец.

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 вазелиновое масло (рис.2.10).

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. 2.11).

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).

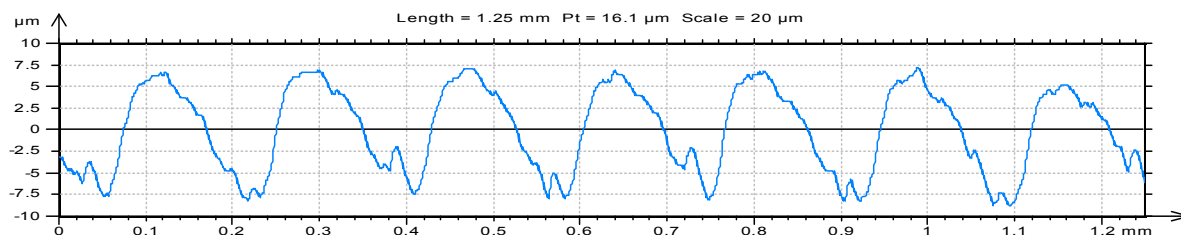


Рис.2.11. Результаты измерения исходной шероховатости образца.

2.6. Методика определения износостойкости покрытий на алюминиевых сплавах при испытании на трение по схеме «диск-колодка».

Испытания при возвратно-поступательном движении образца считаются «мягкими», потому что применяются невысокие нагрузки и небольшие скорости перемещения образца. Для определения износостойкости покрытий в расширенном диапазоне нагрузок были проведены испытания при более «жестких» режимах. Испытания на износостойкость образцов сплава Д1 с покрытием и без покрытия проводились на стандартной машине трения СМЦ-2 в Республиканском трибологическом центре (г. Каунас, Литва).

Машина СМЦ-2 (рис. 2.12) служит для испытаний материалов на износ, а также для определения их фрикционных свойств в условиях трения скольжения или качения. Испытания могут проводиться при нормальных или повышенных температурах для разных схем нагружения: «диск-диск», «палец-втулка», «диск-колодка».

Пара трения «диск-колодка» используется для моделирования работы трибосопряжений сухого и граничного трения и поэтому лучше всего подходит для испытаний покрытий, полученных с помощью электроискрового легирования на алюминиевых сплавах.

Техническая характеристика машины трения СМЦ-2.

Потребляемая мощность, КВт	- 2,2
Частота вращения вала контртела, об/мин	- 300,500,1000
Максимальный момент трения, Нм	-15
Диапазон изменения момента трения, Нм	-1,5 ÷ 15
Диапазон изменений нагрузки, Н	-200 ÷ 2000

Испытания образцов из сплава Д1 с покрытиями из алюминиево-оловянного сплава проводились по схеме: «диск - колодка» (рис. 2.12.). Диск был изготовлен из закаленной инструментальной стали.

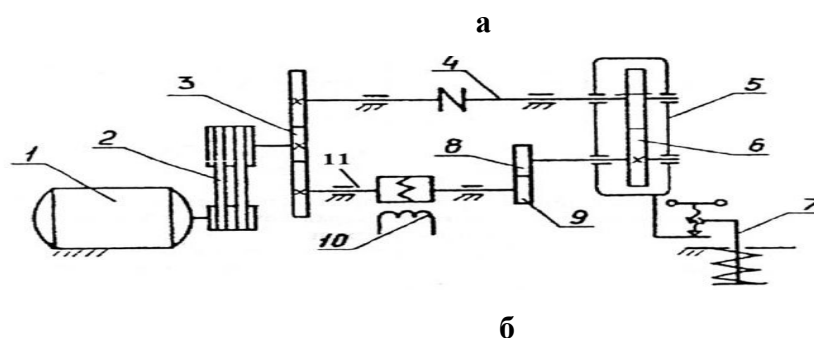


Рис. 2.12 Общий вид машины СМЦ-2 (а) и ее кинематическая схема (б).

1- электродвигатель, 2- клиноременная передача со сменными шкивами, 3- шестерни привода образца и контртела, 4 – промежуточный вал, 5- каретка, 6- сменные шестерни привода образца, 7- нагружающее устройство, 8- образец, 9 – контртело, 10- индукционный датчик момента трения, 11 – торсион.

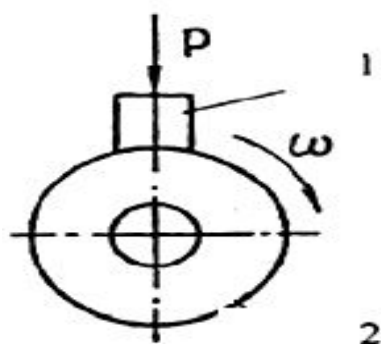


Рис.2.13 Модельная трибосистема «диск-колодка», реализуемая на трибометре СМЦ-2. 1- образец, 2 - контртело.

Для устранения систематических ошибок при проведении сравнительных испытаний покрытий соблюдались следующие положения:

- в пределах одной серии испытаний технология изготовления образцов с помощью электроискрового легирования и технология испытаний на износостойкость были одинаковыми;

- все замеры производились одними и теми же измерительными средствами;

- все эксперименты одной серии проводились на одной установке по одной и той же схеме («диск – колодка») и при одних и тех же параметрах.

Образцы в виде сегментов (рис.2.14) были изготовлены из алюминиевого сплава Д1.

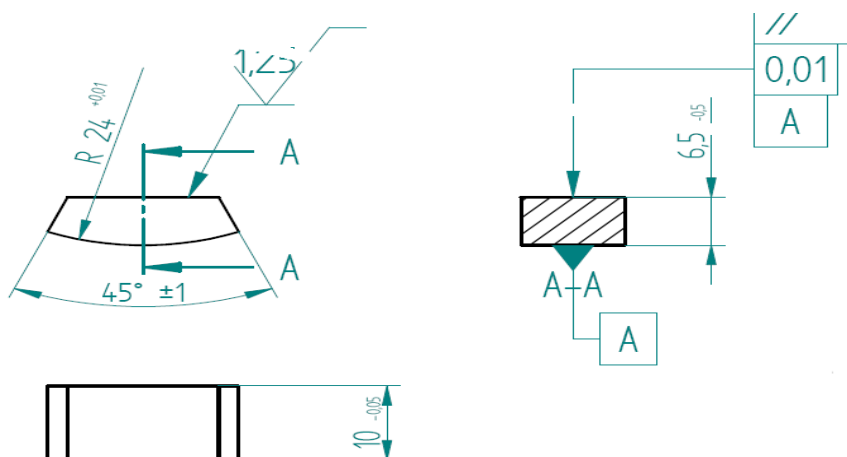


Рис 2.14 Эскизы образцов для нанесения покрытия на плоскую поверхность.

На образцы наносились покрытия с помощью установки для механизированного нанесения покрытий. Испытанию подвергались следующие группы образцов из алюминиевого сплава Д1:

- без покрытия;
- четыре слоя с покрытием чистым алюминием;
- четыре слоя с покрытием Al-Sn;
- восемь слоев с покрытием Al-Sn;
- двенадцать слоев с покрытием Al-Sn;
- двадцать четыре слоя с покрытием Al-Sn.

В одной серии при одинаковых условиях испытывались все шесть типов образцов.

Для испытания образцов с покрытием на машине СМЦ-2 использовались следующие режимы:

- 1 режим - нагрузка постоянная 1000 Н, скорость вращения контртела относительно образца – 270 об /мин. Время нагружения-8 часов;

- 2 режим – нагрузка переменная - 200,400, 600, 800, 1000 Н.; при каждой нагрузке время испытания составляло 15 мин; скорость вращения контртела относительно образца – 270 об /мин. Итого на каждый образец затрачивалось время 75 мин.

Испытания проводились при сухом трении и в смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Использованная методика испытаний позволяла не только исследовать зависимость абсолютного износа поверхностей контртела и обработанной поверхности от параметров обработки, а также определять влияние шероховатости на величину износа. Кроме того методика позволяет исследовать относительные характеристики, в качестве одной из которых использована величина коэффициента износа U , равная отношению абсолютного износа контртела к износу обработанной электроискровым легированием поверхности. Она позволяла исследовать динамику износных характеристик (как образца, так и контртела), а также зависимость величины U от времени тестирования. Так как шероховатость поверхности менялась в процессе тестирования, то абсолютные величины износа также могли меняться со временем. А поскольку при этом происходило удаление части материала с их поверхностей, изменение во времени характеристик износа свидетельствовало о свойствах более глубоких слоев покрытия.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ЭЛЕКТРОДАМИ ИЗ СПЛАВА Al-Sn

С целью определения закономерностей получения покрытий на алюминиевых сплавах с помощью электроискрового легирования обрабатывающими электродами из сплава Al-Sn был проведен ряд экспериментов с изменяющимися параметрами работы установки ALIER-31: режимами работы (1÷7), амплитудой вибрации (0,2÷1), коэффициентом энергии (0,1÷1,0). Нанесение покрытия производилось, как в ручном режиме, так и в механизированном при изменении скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно образца от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $2,0 \cdot 10^{-3}$ м/сек.

3.1 Получение покрытий на сплавах Д1 при электроискровом легировании в ручном режиме.

Результаты экспериментов по нанесению покрытий в ручном режиме приведены в таблицах 3.1 ÷ 3.7 и на рисунках 3.1÷ 3.3.

3.1.1 Эффекты переноса массы.

Результаты первой серии испытаний по нанесению покрытия из сплава Al-Sn на сплав Д1 приведены в таб. 3.1.

Опыты показали, что привес образцов обеспечивается только на 6 и 7 режимах работы установки. С 1 по 5 режим происходит изменение поверхности - появляются лунки, изменяется цвет со светлого на серый, увеличивается шероховатость, происходит модифицирование поверхности. Происходит убыль как электрода так и образца.

С увеличением энергии импульса (с 1 по 4 режим) увеличивается унос материала электрода в 27 раз, в то время как унос материала образца увеличился всего лишь в 2 раза. Это говорит о том, что материал электрода переносится на образец, но унос материала образца превосходит привес от материала электрода. Особенно сильно происходит привес образца при переходе от 6 к 7 режиму (почти на 100%), в то время как увеличение уноса электрода составляет 17%. 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.

Для того чтобы установить влияние находящегося на поверхности электрода SnO_2 на перенос вещества на образец, была проведена вторая серия испытаний (таб.3.2).

Таблица 3.1

Результаты опытов по переносу вещества Al-Sn с электрода на алюминиевую подложку из сплава Д1 при электроискровом легировании на установке ALIER-31

№ образца	Условия электроискрового легирования			Вес образцов, г.		Изменение веса образца $\Delta m_{обр}$, г	Вес электрода, г.		Изменение веса электрода $\Delta m_{эл}$, г.	Коэффициент переноса $K = \Delta m_{эл} / \Delta m_{обр} $
	Режим	Амплитуда	Время обработки, с.	До покрытия	После покрытия		До покрытия	После покрытия		
1	1	0,5	60	3,4405	3,4385	-0,0020	6,9901	6,9900	-0,0001	0,0500
2	2	0,5	60	3,4810	3,4774	-0,0036	6,9900	6,9900	-0,0002	0,0555
3	3	0,5	60	3,2060	3,2000	-0,0060	7,2528	7,2501	-0,0027	0,4500
4	4	0,5	60	3,4010	3,3970	-0,0040	6,9900	6,9873	-0,0027	0,6750
5	5	0,5	60	3,6425	3,6441	+0,0016	7,2501	7,2467	-0,0033	2,0635
6	6	0,5	60	3,1075	3,1096	+0,0021	7,2467	7,2384	-0,0083	3,9524
7	7	0,5	60	3,3750	3,3852	+0,0102	7,2384	7,2287	-0,0097	0,9510

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

- на четвёртом режиме работы установки ALIER-31 у всех четырёх образцов наблюдается убыль веса от 0,001 до 0,011 г.;
- появление чёрного налёта на электроде никак не сказывается на привесе образца;
- убыль электрода также остаётся одинаковой, независимо от наличия или отсутствия чёрного налёта.

Для изучения влияния режима обработки на процесс переноса массы сплава Al-Sn на образец из сплава Д1 была проведена следующая серия испытаний (таб. 3.3).

В результате испытаний установлено:

- при одних и тех же условиях нанесения покрытия 4 и 5 режимы не приводят к увеличению толщины слоя покрытия на образце из сплава Д1;

- применение 6 и особенно 7 режимов значительно увеличивает привес образца. При этом поверхность образца становится более шероховатой;
- изменение коэффициента энергии с 0,4 до 1,0 приводит к значительному увеличению привеса образца.

Учитывая более равномерный, с низкой шероховатостью, характер покрытия образцов, получаемый на 6 режиме работы установки, а также достаточно толстый слой покрытия при использовании коэффициента энергии $0,8 \div 1,0$, эти режимы приняты за оптимальные для данных сплавов. В последующих сериях использовались именно эти режимы установки электроискрового легирования.

Таблица 3.2.

Результаты экспериментов по получению покрытий на сплаве Д1 при помощи электроискрового легирования электродами из Al-Sn на 4 режиме.

№ образца	Условия электроискрового легирования			Вес образца, г		Изменение веса, $\Delta m_{обр}$, г.	Вес электрода, г		Изменение веса $\Delta m_{эл}$, г.	Примечания
	Режим	Амплитуда	Время обраб.	До покрытия	После покрытия		До покрытия	После покрытия		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	4	0,5	60	8,144	8,133	-0,011	3,361	3,348	-0,013	Рабочая поверхность электрода не зачищалась наждачной бумагой от черного налета.
			60	8,133	8,122	-0,011	3,348	3,336	-0,012	
			60	8,122	8,115	-0,008	3,336	3,330	-0,016	
			60	8,115	8,105	-0,010	3,330	3,329	-0,001	
2	4	0,5	60	8,448	8,445	-0,003	3,329	3,327	-0,002	
			60	8,445	8,443	-0,002	3,327	3,324	-0,003	
			60	8,443	8,442	-0,001	3,324	3,322	-0,002	
			60	8,442	8,440	-0,002	3,322	3,319	-0,003	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	4	0,5	60	8,320	8,316	-0,004	3,320	3,317	-0,003	Рабочая поверхность электрода через каждую минуту работы зачищалась наждачной бумагой от черного налета до металлического блеска.
			60	8,316	8,309	-0,007	3,309	3,306	-0,003	
			60	8,309	8,302	-0,007	3,300	3,296	-0,004	
			60	8,302	8,298	-0,004	3,289	3,282	-0,007	
4	4	0,5	60	8,550	8,540	-0,010	3,280	3,278	-0,012	
			60	8,540	8,540	-0,000	3,270	3,268	-0,002	
			60	8,540	8,535	-0,005	3,260	3,260	-0,000	
			60	8,535	8,529	-0,006	3,254	3,250	-0,006	

Таблица 3.3.

Результаты экспериментов по изучению влияния режима на привес образцов из сплава Д1.

№ образца	Условия электроискрового легирования			Вес образца г.		Изменение веса, $\Delta m_{бр}$, г.	Вес электрода, г		Изменение веса $\Delta m_{эл}$, г.	Коэффициент переноса $K = \Delta m_{эл} / \Delta m_{обр} $	Примечания
	Режим	Амплитуда	Время обработки с.	До покрытия	После покрытия		До покрытия	После покрытия			
1	4	0,8	60	8,346	8,340	-0,006	3,243	3,241	-0,002	0,333	Образец был разделен на 4 зоны по 12,5 мм. На каждую зону покрытие наносилось в течение 60 секунд, всего на образец – 240 секунд.
			60	8,340	8,334	-0,006	3,241	3,240	-0,001	0,166	
			60	8,334	8,327	-0,007	3,240	3,236	-0,004	0,571	
			60	8,327	8,320	-0,007	3,236	3,235	-0,001	0,142	
2	4	0,8	60	8,168	8,163	-0,005	3,232	3,229	-0,003	0,600	
	5		60	8,163	8,156	-0,007	3,229	3,227	-0,002	0,285	
	6		60	8,156	8,165	+0,009	3,227	3,207	-0,020	22,222	
	7		60	8,165	8,211	+0,046	3,207	3,154	-0,052	1,130	
3	6	0,8	60	8,127	8,117	+0,010	3,154	3,148	-0,006	0,600	
			60	8,117	8,128	+0,011	3,148	3,129	-0,019	1,727	
			60	8,128	8,149	+0,019	3,129	3,316	-0,031	1,632	
			60	8,149	8,222	+0,063	3,160	3,240	-0,080	1,269	

Учитывая более равномерный, с низкой шероховатостью, характер покрытия образцов, получаемый на 6 режиме работы установки, а также достаточно толстый слой покрытия при использовании коэффициента энергии $0,8 \div 1,0$, эти режимы приняты за оптимальные для данных сплавов. В последующих сериях использовались именно эти режимы установки электроискрового легирования.

В следующей серии испытаний проверялась возможность получения многослойного покрытия на сплаве Д1. На каждый образец при оптимальных режимах наносилось последовательно 4 слоя покрытия (таб. 3.4).

Таблица 3.4

Результаты экспериментов по получению покрытий на сплаве Д1 при помощи электроискрового легирования электродами из Al-Sn при режимах 6 и 7.

№ образца	Условия электроискрового 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} $	Примечания
	Режим	Амплитуда	Время обработки	До покрытия	После покрытия		До покрытия	После покрытия			
1	6	0,8	60	8,514	8,556	+0,042	2,517	2,477	-0,043	4,75	Слои покрытия наносились последовательно, один на другой с перерывом на взвешивание. Слой покрытия наносился за 60 секунд по всей длине образца. Всего наносилось 4 слоя.
			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	7	0,8	60	8,260	8,294	+0,034	2,457	2,418	-0,039	1,14	
			60	8,294	8,290	-0,004	2,418	2,415	-0,003		
			60	8,290	8,288	-0,002	2,415	2,411	-0,004		
			60	8,288	8,294	+0,006	2,411	2,397	-0,004		
3	6	0,8	60	8,622	8,658	+0,036	2,397	2,348	-0,049	1,36	Наносился 1 слой по всей длине образца за 120 с
4	7		60	8,170	8,225	+0,055	2,348	2,279	-0,068	1,24	

Испытания показали, что при нанесении 4 слоёв вручную только первый слой даёт привес, второй и последующие слои привеса не дают, хотя разрушение анода происходит за счет распыления материала в межэлектродном пространстве. Для определения роли материала образца (алюминиевый сплав или сталь) в образовании покрытия из алюминиевого сплава была проведена очередная серия испытаний. Покрытие из сплава Al-Sn наносилось на стальной образец из Ст3. Кроме оптимального режима (режим 6,

коэффициент энергии 1.0), было решено проверить и режим 4, так как при нанесении алюминиевого покрытия на сталь условия нанесения значительно меняются (таб.3.5).

В результате испытаний установлено следующее:

- на стальной образец покрытие из сплава Al-Sn наносится гораздо легче и даже при 4 режиме имеет положительную динамику. При этом следует отметить, что покрытие наносится более равномерно по сравнению с алюминиевым сплавом;
- при одинаковых режимах на стальной образец наносится большее количество алюминиевого сплава, чем на алюминиевый образец;
- при нанесении четырёх слоёв на стальной образец все четыре слоя обеспечивают привес. Хотя с каждым слоем количество переносимого на образец алюминиевого сплава уменьшается, но остаётся гораздо большим, чем на сплаве Д1.

Таблица 3.5

Результаты экспериментов по нанесению покрытий из сплава Al-Sn на стальной образец.

№ образца	Условия электроискрового легирования			Вес образца, г.		Изменение веса, Δmобр, г.	Вес электрода, г		Изменение веса Δmэл, г.	Коэффициент переноса $K = \frac{ \Delta m_{эл} }{\Delta m_{обр}}$	Примечания
	Режим	Амплитуда	Время обработки, с.	До покрытия	После покрытия		До покрытия	После покрытия			
1	4	1,0	60	36,693	36,706	+0,013	4,486	4,463	-0,023	1,92	Покрyтия наносились на образец в один слой по каждому из четырех участков образца (L по 12,5 мм x 4 участка). Всего на образец – 240 секунд.
			60	36,706	36,722	+0,016	4,463	4,446	-0,017		
			60	36,722	36,728	+0,006	4,446	4,427	-0,019		
			60	36,728	36,740	+0,012	4,427	4,407	-0,020		
2	6	1,0	60	36,366	36,420	+0,054	4,407	4,345	-0,062	1,25	
			60	36,420	36,443	+0,023	4,435	4,317	-0,028		
			60	36,443	36,469	+0,026	4,317	4,276	-0,041		
			60	36,469	36,511	+0,042	4,276	4,232	-0,044		
3	4	1,0	120	36,570	36,592	+0,022	2,652	2,624	-0,028	5,94	Покрyтие наносилось в 4 слоя по всей длине образца. Один слой наносился 2 минуты, на образец – 480 секунд.
			120	36,592	36,593	+0,001	2,624	2,606	-0,018		
			120	36,593	36,608	+0,015	2,606	2,580	-0,026		
			120	36,608	36,616	+0,008	2,580	2,565	-0,015		

Для проверки возможности нанесения покрытия из чистого алюминия на сплав Д1 с помощью электроискрового легирования была проведена новая серия испытаний (таб. 3.6).

Эксперименты показали, что с помощью электроискрового легирования на сплав Д1 наносить покрытие из чистого алюминия можно, но с очень большими ограничениями из-за сильного прилипания электродов к образцу. Даже тонкие электроды диаметром 2 мм при 7 режиме настолько прилипают к образцу, что нанесение покрытия становится весьма затруднительным.

Таблица 3.6

Результаты экспериментов по нанесению покрытий из чистого алюминия на образец из сплава Д1.

№ образца	Вес образца г.		Изменение веса, Δmобр, г.	Вес электрода, г		Изменение веса Δmэл, г.	Коэффициент переноса K= Δmэл / Δ mобр 	Примечания
	До покрытия	После покрытия		До покрытия	После покрытия			
1	8,861	8,881	+0,020	1,738	1,691	-0,047	3,58	Покрывтия наносились электродом Ø2 мм в 4 слоя, каждый слой по 180с. Электроды Ø 4 ÷ 6 мм не могли быть использованы из-за сильного прилипания к образцам
	8,881	8,895	+0,014	1,691	1,652	-0,039		
	8,895	8,898	+0,003	1,652	1,636	-0,016		
	8,898	8,905	+0,007	1,636	1,609	-0,027		
2	8,356	8,385	+0,029	1,443	1,405	-0,038	1,48	
	8,385	8,416	+0,031	1,405	1,365	-0,040		
	8,416	8,447	+0,031	1,365	1,320	-0,045		
	8,447	8,463	+0,016	1,320	1,290	-0,030		

В результате проведения экспериментов (таб.3.1 ÷ 3.4) установлено:

1. При режимах работы установки с низкой энергией импульсов (режимы 1÷4 энергия импульса до 0,39 Дж) покрытие на образце из сплава Д1 не образуется, хотя унос материала

с анода происходит. Механизм этого явления объясняется тем, что распыляемый с электрода-анода материал достигает образца (катода), но выброс металла с образца превышает привес от материала электрода. Поверхность образца модифицируется без увеличения толщины слоя (график изменения веса электрода и образца на рис.3.1.)

2. При увеличении энергии импульса (режимы 6 и 7, энергия импульса 1,58 и 3,15 Дж соответственно) количество материала, уносимого с анода, увеличивается в 5÷6 раз, но одновременно увеличивается привес катода за счет материала анода (график изменения веса электрода и образца на рис. 3.2.).

3. При нанесении покрытий из алюминиево-оловянных сплавов энергия работы установки играет исключительно важную роль, особенно в тех случаях, когда необходимо наращивание слоя для восстановления изношенных поверхностей алюминиевых деталей.

Типичные кривые изменения веса образца и обрабатывающего электрода приведены на рисунках 3.1, 3.2. Кривые на рисунке 3.1 показывают, что вплоть до 5 режима включительно (энергия импульса 0,79 Дж), привеса образца не происходит, хотя унос материала с анода происходит регулярно и в достаточно большом количестве. В случае, когда применялся 6 и 7 режим (рис 3.2), привес наблюдался только на первом нанесённом на образец слое покрытия. При последующем нанесении слоёв привес снижается вплоть до того, что происходит убыль образца, то есть частичное разрушение полученного покрытия. В этом случае подтверждается закономерность ограничения толщины получаемого слоя покрытия из-за накопления внутренних напряжений в поверхностном слое, что соответствует теории и практике электроискрового легирования. Таким образом, для алюминиевых сплавов эта закономерность соблюдается.

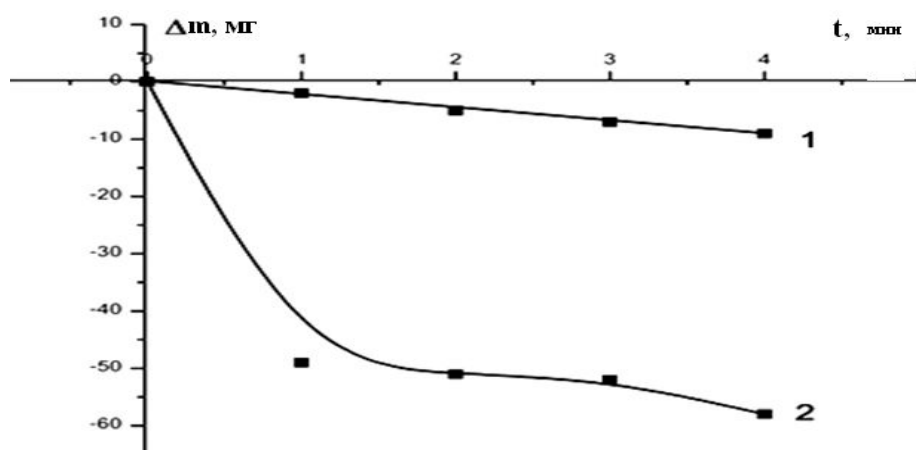


Рис. 3.1 Зависимость изменения массы обрабатывающего электрода (1) и обрабатываемого образца (2) от времени обработки, при обработке в режимах 1-4 ALIER-31.

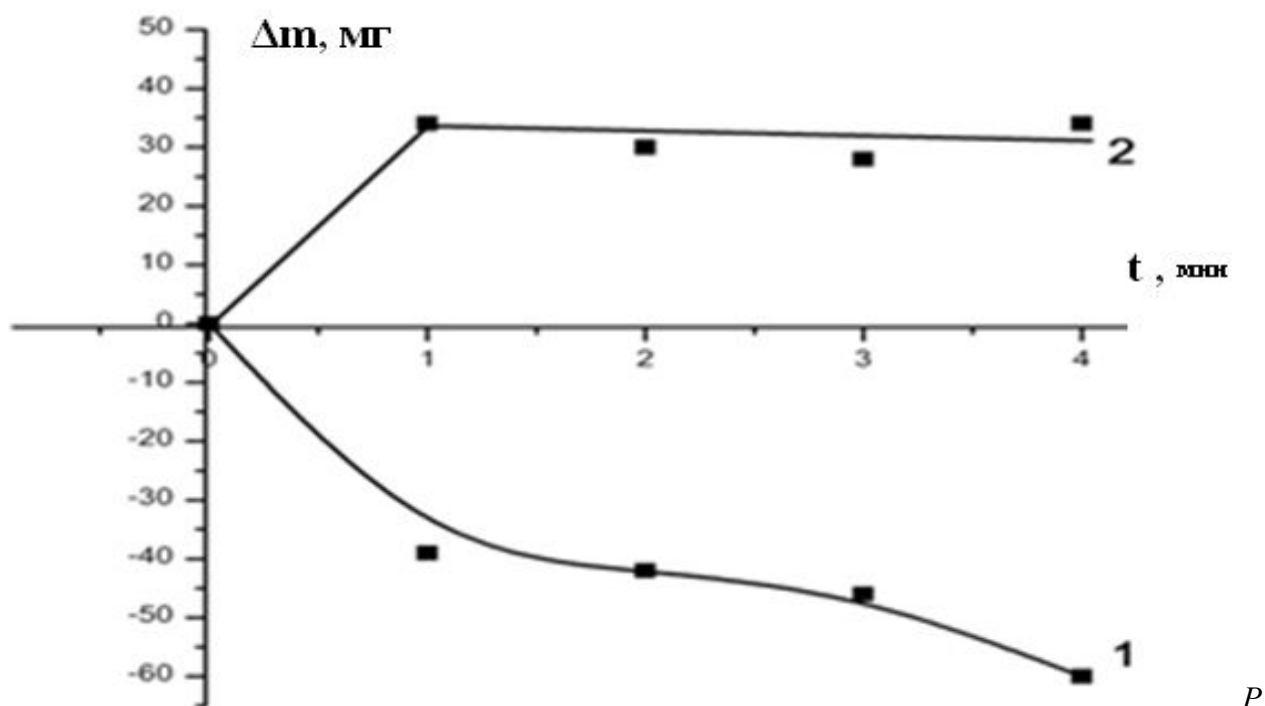


рис 3.2. Зависимость изменения массы обрабатывающего электрода (1) и обрабатываемого образца (2) от времени обработки, при обработке в режимах 6-7 ALIER-31.

На обобщённом графике (рис 3.3) показаны изменения в весе как для образцов, так и для электродов, при изменении режима работы установки для электроискрового легирования. Видно, что при относительно малых энергиях импульса имеет место потеря в весе образца, увеличивающаяся с увеличением энергии импульса. Это область I на рис. 3.3. В указанной области наблюдается относительно малая потеря в весе обрабатывающего электрода.

При увеличении энергии в импульсе картина существенно меняется. И при достаточно высоких энергиях наблюдается полярный перенос материала электрода на поверхность образца, сопровождающийся приращением его в весе.

Коэффициент переноса K (отношение привеса образца к весу вещества, удаленного с обрабатывающего электрода) в среднем был равным $K \sim 0,3$. Область II на рис. 3.3 представляет собой классический вариант электроискрового легирования применительно к использованному материалу обрабатывающего электрода. В промежуточной области наблюдался значительный износ обрабатывающего электрода при относительно низком переносе материала на поверхность образца (рис. 3.3).

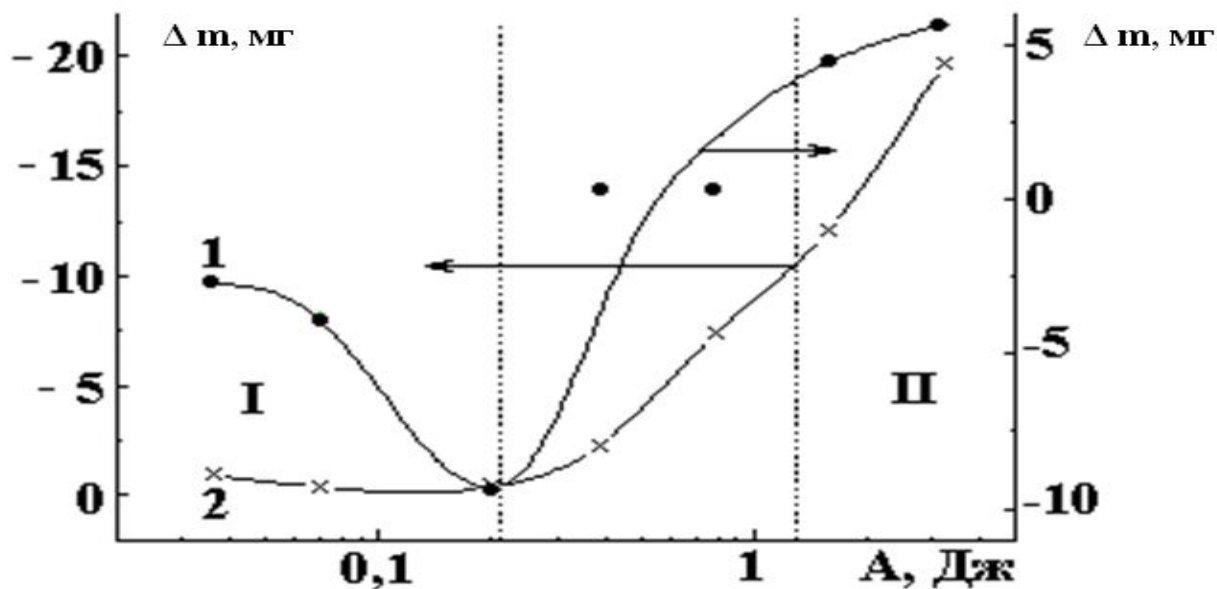


Рис 3.3 Обобщённый график влияния энергии импульса на изменение массы образца (1) и обрабатывающего электрода (2)

3.1.2 Состав и морфология полученных покрытий.

На рис. 3.4 приведена морфология поверхности образца и обрабатывающего электрода после обработки при режимах, соответствующих области I на рис. 3.3. Из результатов элементного анализа (таб. 3.7) видно, что они представляют смесь оксидов и нитридов алюминия (образец), а также оксидов алюминия, олова и меди.

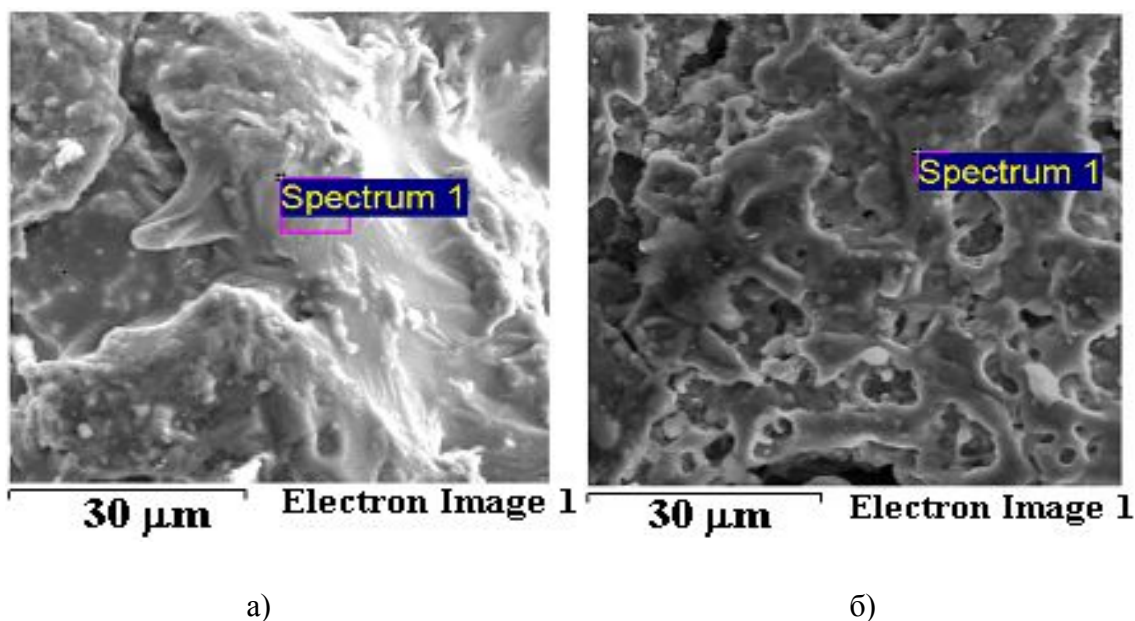


Рис. 3.4 Морфология поверхности обрабатывающего электрода (а) и образца (б) после обработки методом электроискрового легирования в режимах 4(а) и 1(б).

Таблица 3.7.

Состав (весовые %) поверхности образца после обработки в режимах, соответствующих области I.

Элемент	C	N	O	Al	Cu	Sn
Образец в режиме 1	4,1	13,1	29,4	53,3	-	-
Обрабатывающий электрод в режиме 4	10,4	-	3,3	82,7	1,8	1,3

Приведенные фотографии поверхности и результаты анализа типичны для обработки в режимах 1÷5. При этом состав поверхностей мог незначительно изменяться. В частности, на поверхностях образцов в режимах 2÷5 присутствовало олово (в незначительных количествах), а иногда – и медь. В состав обрабатывающего электрода и образца входил углерод. Это может быть обусловлено тем, что плавку обрабатывающего электрода проводили в графитовом тигле. Морфология поверхностей, полученных в указанных условиях, является характерной для оплавленных поверхностей.

Приведенные результаты подтверждают результаты измерений потерь в весе, из которых следует, что область I – это область электроэрозионной обработки в воздушной среде. Похожая картина наблюдается для образцов, обработанных при режимах 4, 5 (см. область промежуточных режимов, представленных на рис. 3.3).

Что же касается области II графика на рис. 3.3, то наряду с составом и морфологией поверхности, характерных для области I и промежуточной области, на поверхностях образцов и обрабатывающего электрода, обрабатываемых при этих режимах, зафиксированы специфические структуры в виде нитей, диаметр которых меньше 1 мкм (рис.3.5). На рис. 3.6 микро – и нанонити представлены при большем увеличении.

В таб. 3.8 представлен состав поверхности образцов после обработки в этих условиях.

Таблица 3.8.

Состав поверхностей образцов после обработки в режимах 6 и 7 (средние значения)

Элемент	Al	Sn	O	N	C
Вес, %	50,0 ± 4,8	34,8 ± 2,6	7,7 ± 1,5	2,2 ± 0,6	5,3 ± 2,6

Видно, что по сравнению с другими режимами резко возрастает концентрация олова на поверхности образца (таб. 3.8). Анализ состава нитей показывает, что в основном это диоксид олова (таб. 3.9).

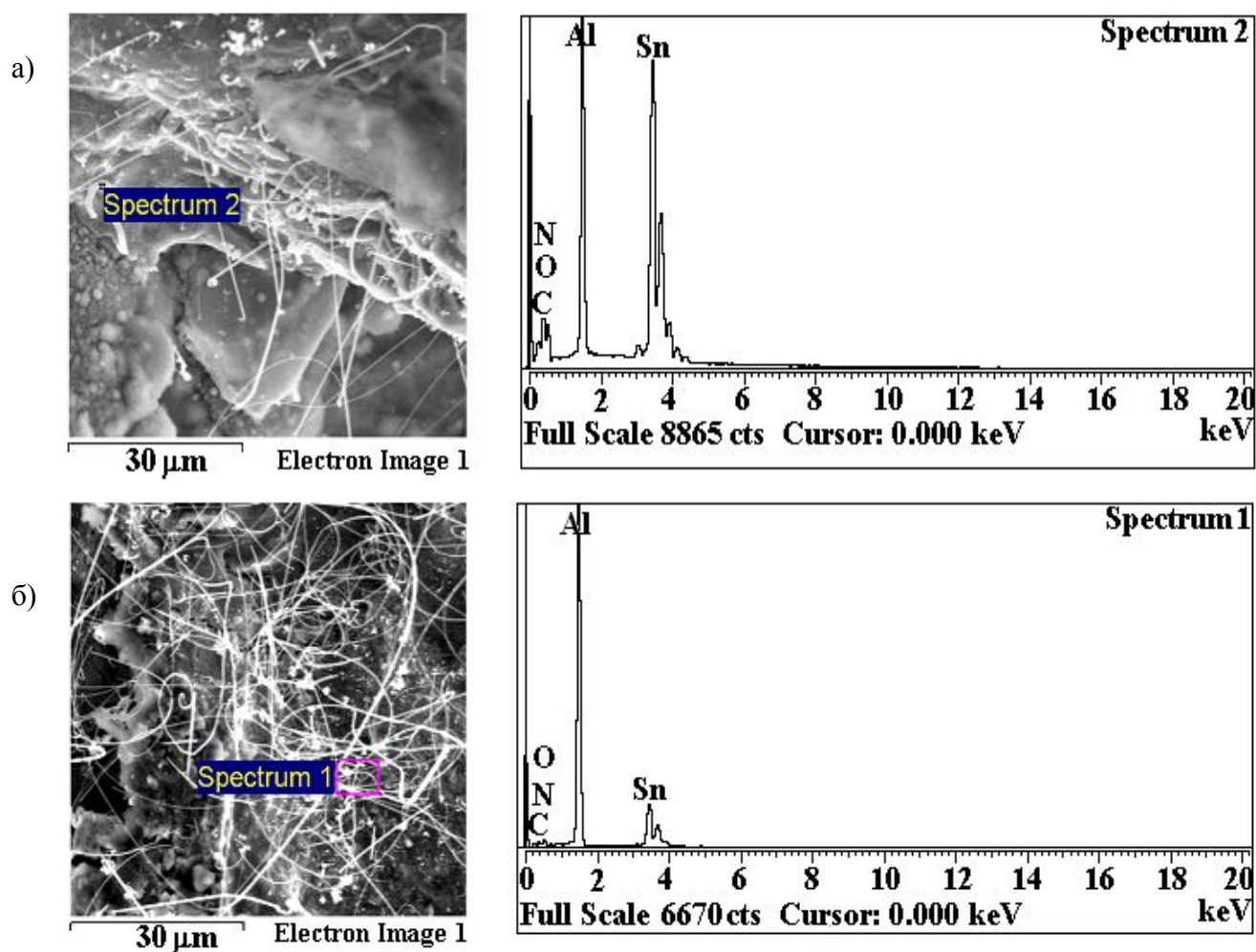


Рис.3.5. Морфология поверхности и EDX-спектры обрабатывающего электрода(а) и образца (б) после обработки в режимах 6 (а) и 7 (б)

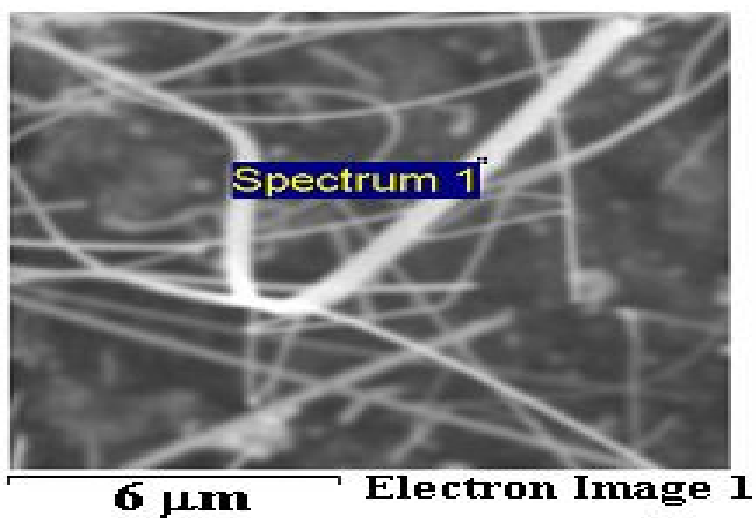


Рис. 3.6. Поверхность образца после обработки в режиме 7 (фрагмент рис. 3.5,б)

Таблица 3.9

Элементный состав нити на образце после обработки в режиме 6 .

Элемент	Al	Sn	O	N	C
Вес, %	19,1	61,5	11,5	4,9	3,0

В табл. 3.9 представлены результаты элементного анализа крупного фрагмента нити на образце, из которого следует, что концентрация олова в нити более 60% (вес.), а кислорода более 11% . Однако, однозначно ответить на вопрос, являются ли они исключительно состоящими из олова (его оксидов) или содержат также алюминий и его оксиды, но в меньшем, чем олово количестве, нельзя. Причиной такого положения является ограниченность метода анализа EDX, так как этот метод фиксирует наличие компонентов не только в объеме нити, но и частично включает объемы поверхностных слоев, на которых эти нити находятся.

3.1.3. Физические основы получения микро – и нанонитей.

Для выяснения причин появления микро – и нанонитей двуоксида олова (SnO_2) в алюминиевой матрице, которая по предположению обеспечивает высокую износостойкость покрытия на сплаве Д1, был проведен анализ диаграммы состояния двойной системы Al-Sn [165] (рис. 3.7). Видно, что при комнатной температуре (до температуры плавления олова - 228°C) материал, используемый в качестве обрабатывающего электрода (АО20-1), должен представлять собой алюминиевую матрицу с диспергированным в ней металлическим оловом.

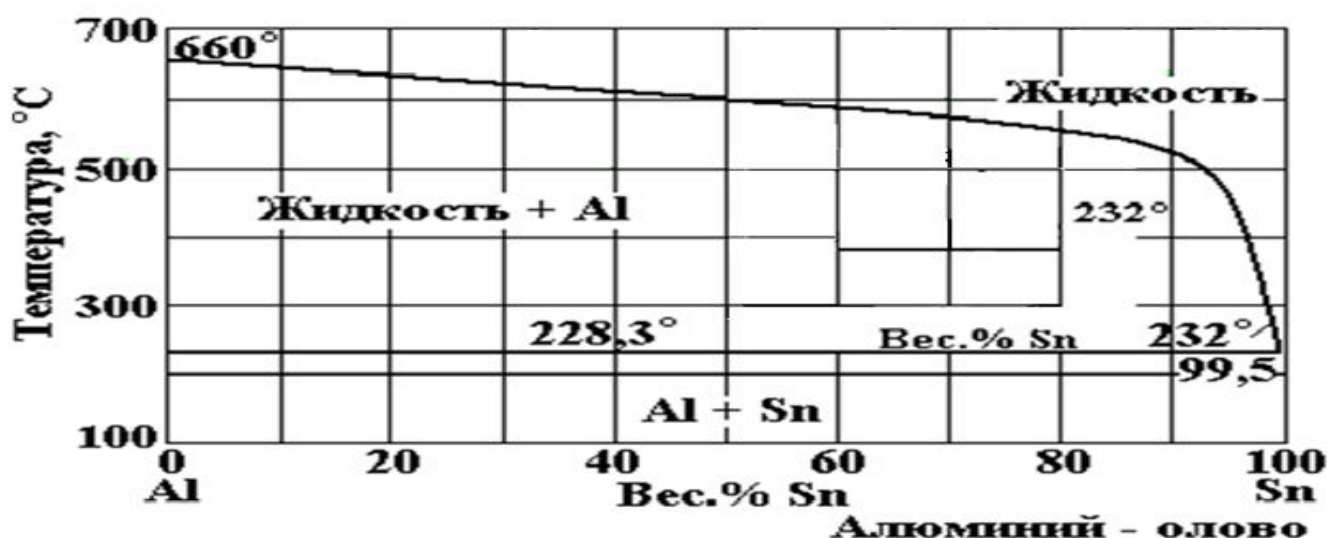


Рис. 3.7. Диаграмма состояния системы алюминий – олово.

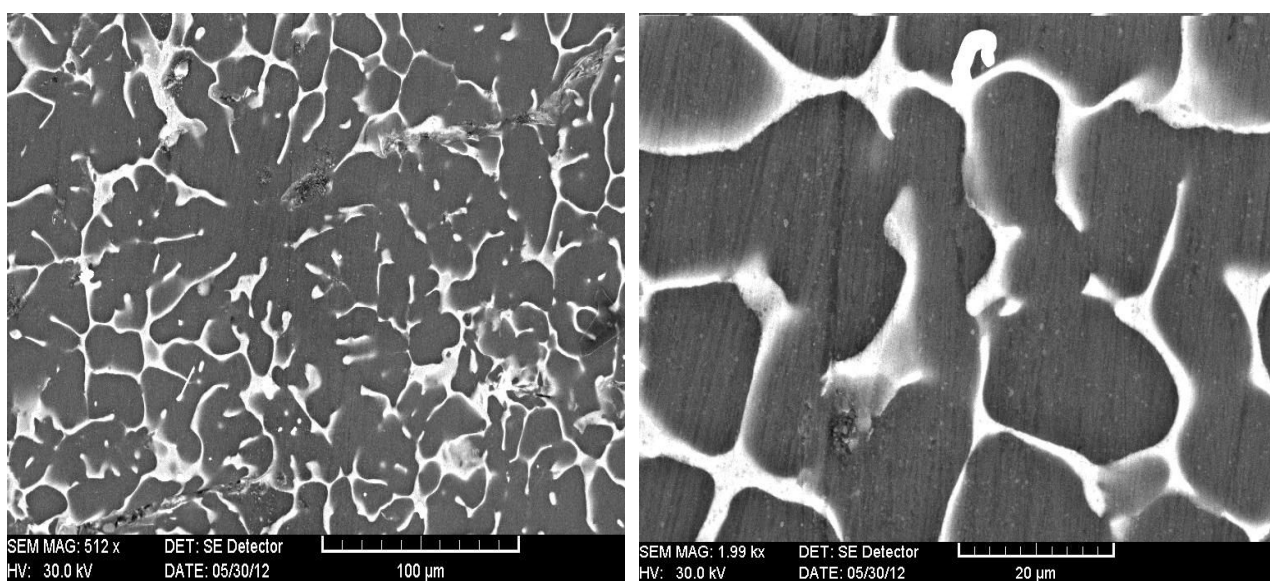


Рис.3.8 Микрофотографии структуры электрода из сплава Al-Sn при различном увеличении. (Светлая сетка-олово, тёмные зёрна - алюминий).

Это подтверждается результатами сканирующей электронной микроскопии и EDX-элементного анализа (рис. 3.9), а также сканирования по поверхности образца с одновременным определением алюминия и олова (рис.3.10).

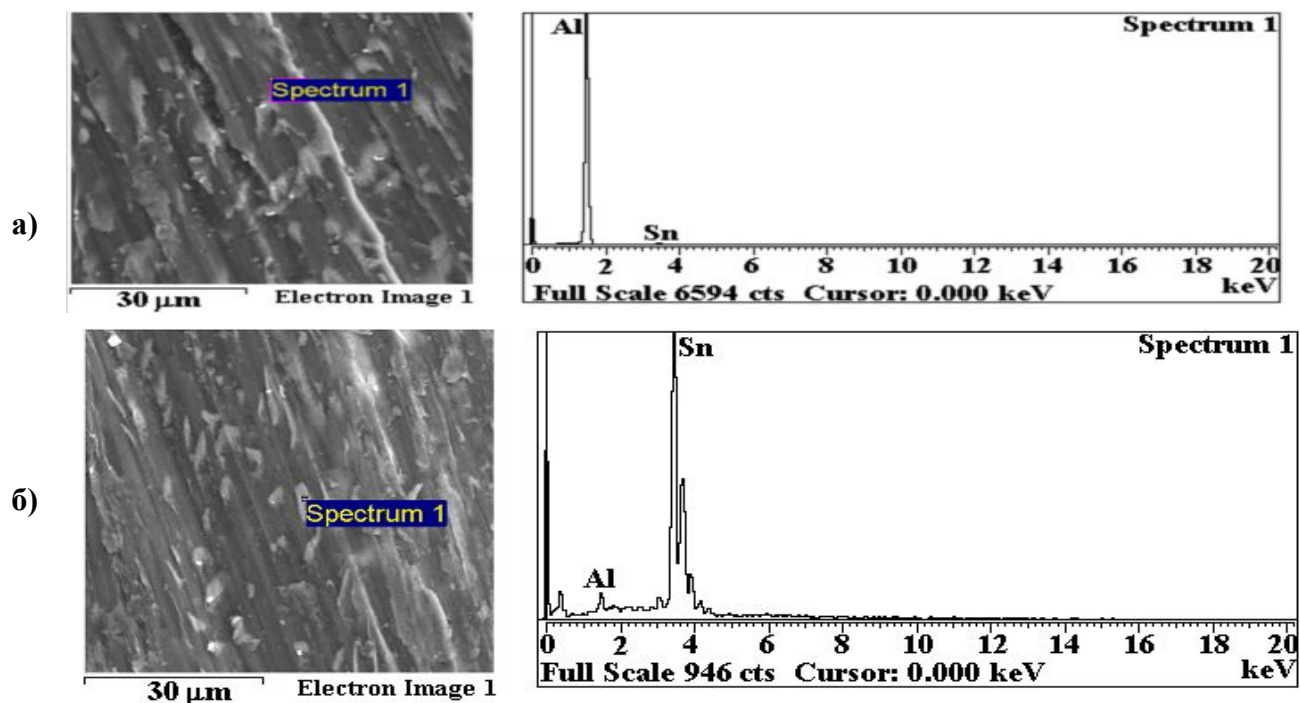


Рис. 3.9 Микрофотографии поверхности обрабатывающего электрода и EDX-спектры матрицы (а) и диспергированного олова (б). Белые включения представляют собой вкрапления Sn в алюминиевой матрице.

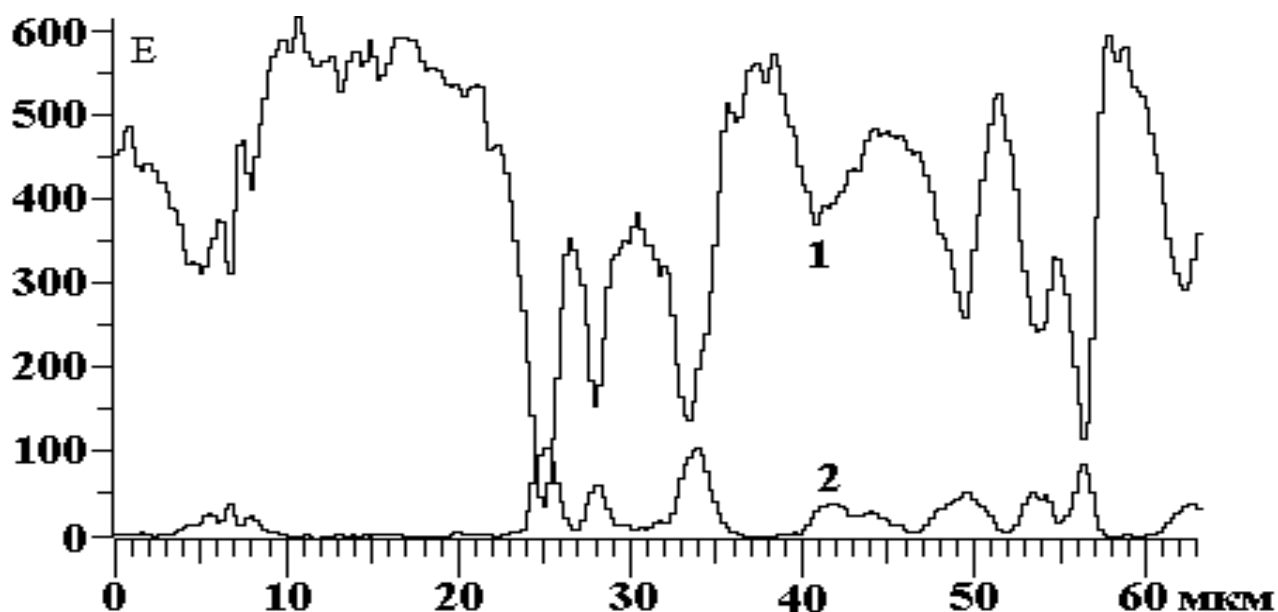


Рис. 3.10 Распределение алюминия (1) и олова (2) по поверхности обрабатываемого электрода. Уровни EDX-спектра приведены в относительных единицах E.

Видно (рис 3.8), что обрабатывающий электрод действительно представляет собой алюминиевую матрицу с диспергированными в ней частицами олова размером $(3\div 5)\cdot 10^{-6}$ м., имеющие форму тонкой сетки или равномерно распределённых в матрице дисперсных частиц. Такая структура образуется в результате того, что в начале кристаллизации сплава выпадают более тугоплавкие кристаллы алюминия и оттесняют жидкое олово на границы зёрен, где оно впоследствии и кристаллизуется в виде прослоек. Это подтверждается экспериментом: при нагреве электрода в электрической печи до температуры 350°C на его поверхности выступают мелкодисперсные капельки олова, видимые невооружённым глазом.

В условиях электроискрового легирования, то есть при локальном повышении температуры в месте контакта электрода с образцом, система представляет собой расплавленные частички диспергированного олова, находящиеся в твёрдой матрице алюминия.

Таким образом, при электроискровом легировании электродами из алюминиево-оловянного сплава, перенос частиц олова в межэлектродный промежуток осуществляется вследствие действия электромагнитных сил, которые деформируют поверхность расплавленной капли в том случае, если для расплавленных частиц сила поверхностного натяжения системы расплав-воздух достаточно мала. Для системы расплав олово-воздух как раз и наблюдаются минимальные значения сил поверхностного натяжения [166]. Очевидно, что вследствие малости сил поверхностного натяжения расплавленных частиц олова (или олова, частично обогащённого алюминием), электромагнитные силы, возникающие вследствие наличия электромагнитного поля в межэлектродном промежутке, настолько их

превышают, что в результате дробления дисперсных частиц образуются волокна диаметром менее $1 \cdot 10^{-6}$ м.

Факты подобного рода должны наблюдаться не только для системы Al-Sn, но и для любых других систем, которые образуют механические смеси (то есть элементы не растворяются друг в друге и не образуют химических соединений) и при определенных температурах будут представлять собой систему расплавленных частиц, находящихся в твердой матрице. Такими системами могут быть Al-Pb, Fe-Pb, Cu-Pb и другие, которые широко применяются в промышленности в качестве антифрикционных сплавов.

В результате исследования установлено, что в условиях электроискрового легирования обрабатываемыми электродами из материалов, представляющих механическую смесь относительно легкоплавкого компонента, диспергированного в относительно тугоплавком (например, система Al-Sn), возможно образование в межэлектродном промежутке нитей из материала, обогащенного легкоплавким компонентом. Образующиеся нити переносятся на поверхность образца, что резко увеличивает концентрацию легкоплавкого компонента в поверхностном слое при электроискровом легировании. Полученные в покрытии микро – и нанонити олова или его оксида (в зависимости от атмосферы в межэлектродном промежутке) могут играть роль «арматуры», связывающей слои и обеспечивающие привес образца, что делает возможным использование таких покрытий для восстановления поверхностей из алюминиевых сплавов.

Можно констатировать, что подобный метод получения микро- и нанонитей в условиях электроискрового легирования является аналогом электроспиннинга – метода получения нанонитей из расплавов или полимеров в электрическом поле [62].

3.2 Получение покрытий с помощью электроискрового легирования на сплаве Д1 при механизированном нанесении.

Исследования показали, что состав получаемых покрытий, а также их свойства должны в значительной степени зависеть от условий взаимодействия обрабатывающего электрода с поверхностью детали, поскольку подобные условия определяют контролируемость параметров обработки. Однако при ручном нанесении покрытия контролировать и сохранить такие условия затруднительно, так как такие параметры как скорость перемещения обрабатывающего электрода относительно обрабатываемой поверхности, усилие его прижима к поверхности детали задаются оператором и могут значительно колебаться, то есть по существу быть неконтролируемыми.

Механизированное нанесение покрытий дает значительные преимущества по сравнению с ручным способом. При механизированном получении покрытия слой получается более ровный и качественный, так как обеспечивается большая стабильность, интенсивность и однородность механизированного процесса, фиксируются и параметры поперечной вибрации, которая обеспечивает ширину получаемого слоя покрытия. Вследствие этого сплошность, плотность и чистота поверхности слоя механизированного электроискрового легирования лучше, а производительность процесса выше, чем при ручном нанесении покрытия. Еще одним преимуществом механизированного нанесения покрытия является хорошая воспроизводимость процесса, так как скорость перемещения электрода по детали или скорость и величина поперечных вибраций электрода определяется конкретным числовым параметром, а не условным «больше» или «меньше» при ручном нанесении покрытия.

Воспроизводимость процесса электроискрового легирования особенно важна при многослойном нанесении покрытий, когда требуется получить, более толстый слой при пониженной шероховатости. В некоторых случаях для получения качественного покрытия требуется использовать такие параметры процесса (например, стабильную скорость или заданную осцилляцию), которую при ручном режиме осуществить невозможно.

Полученные результаты сведены в таблицу 7 в приложении 1, на которой представлена общая картина исследования.

Исходя из таблицы 1 приложения 1 видно, что при скорости перемещения суппорта $V=0,3$ мм/с средний показатель шероховатости составил $Ra \sim 12$ мкм., в то время как при скорости перемещения суппорта $V=2,0$ мм/с средняя шероховатость составила по параметру Ra 6,7 мкм., то есть почти в два раза меньше. Рассматривая график (рис.3.11.), можно сделать следующие выводы:

- кривая зависимости шероховатости от скорости перемещения электрода по поверхности образца свидетельствует о снижении Ra от ~ 20 мкм - при малых и до ~ 10 мкм - при высоких скоростях перемещения обрабатываемого электрода относительно поверхности образца;
- минимальная шероховатость после электроискрового легирования достигается при максимальной скорости перемещения обрабатываемого электрода $V=2 \cdot 10^{-3}$ м/с. При такой скорости происходит всего лишь «обыскривание» (то есть своего рода модифицирование без образования привеса) поверхности, которое в свою очередь дает такой конечный результат.

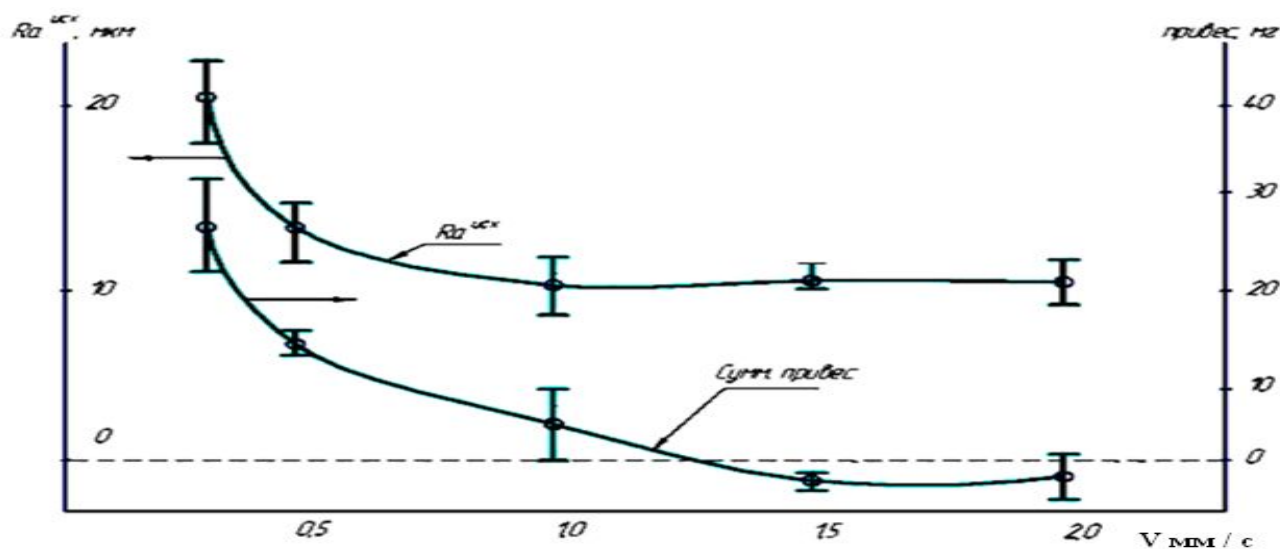


Рис. 3.11. Шероховатости и изменение веса образцов в зависимости от скорости перемещения электрода.

Сравнивая показатель шероховатости и параметр массопереноса вещества (график на рис 3.11.) видно, что перенос вещества разрушающегося электрода на поверхность детали, напрямую зависит от показателей шероховатости и представляет собой примерно такую же линию на графике, что и у показателя шероховатости. То есть можно сделать важный вывод, что шероховатость получаемой поверхности образца при электроискровой обработке будет максимальной при максимальном привесе и наоборот.

Поэтому следующая часть работы была посвящена исследованию получения электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах при более высоком уровне контроля параметров процесса. Это достигалось путём механизации нанесения покрытий и фиксации скорости перемещения обрабатывающего электрода по поверхности детали. Также фиксировались параметры поперечной вибрации, которая обеспечивала ширину получаемого слоя покрытия. При этом исследовались скорость нанесения покрытий, шероховатость, элементный состав и морфология получаемых слоев, а также их износостойкость при трении в масле и без смазки.

Для получения слоя покрытия в контролируемых условиях электроискрового легирования и определения оптимальных режимов была использована экспериментальная установка, описанная в главе 2.

Скорость перемещения обрабатывающего электрода относительно образца изменялась (от $0,3$ до 2) $\cdot 10^{-3}$ м/с. В качестве источника питания применялась установка ALIER-31 при использовании 5 режима [40,167,170]. В используемом варианте обработки поддерживали постоянным число проходов обрабатывающего электрода относительно

обрабатываемой поверхности, равным 4. В связи с увеличением скорости перемещения обрабатывающего электрода V и, соответственно, уменьшением времени обработки поверхности, величина энергии, вводимой в межэлектродный промежуток, снижалась пропорционально увеличению скорости V , что сказалось на привесе образца (рис.3.11.).

На рис.3.12. представлены фотографии обработанной поверхности при различных значениях скорости V (для режима I, см. гл 2). Особенностью представленных результатов является образование достаточно толстых нитей, которые позволяют более точно измерить их элементный состав (рис. 3.12г, 3.13.). Как видно, образующиеся нити представляют собой ядро из Sn, покрытое оксидом олова. Это следует из того факта, что содержание олова превышает необходимое для SnO_2 по стехиометрии.

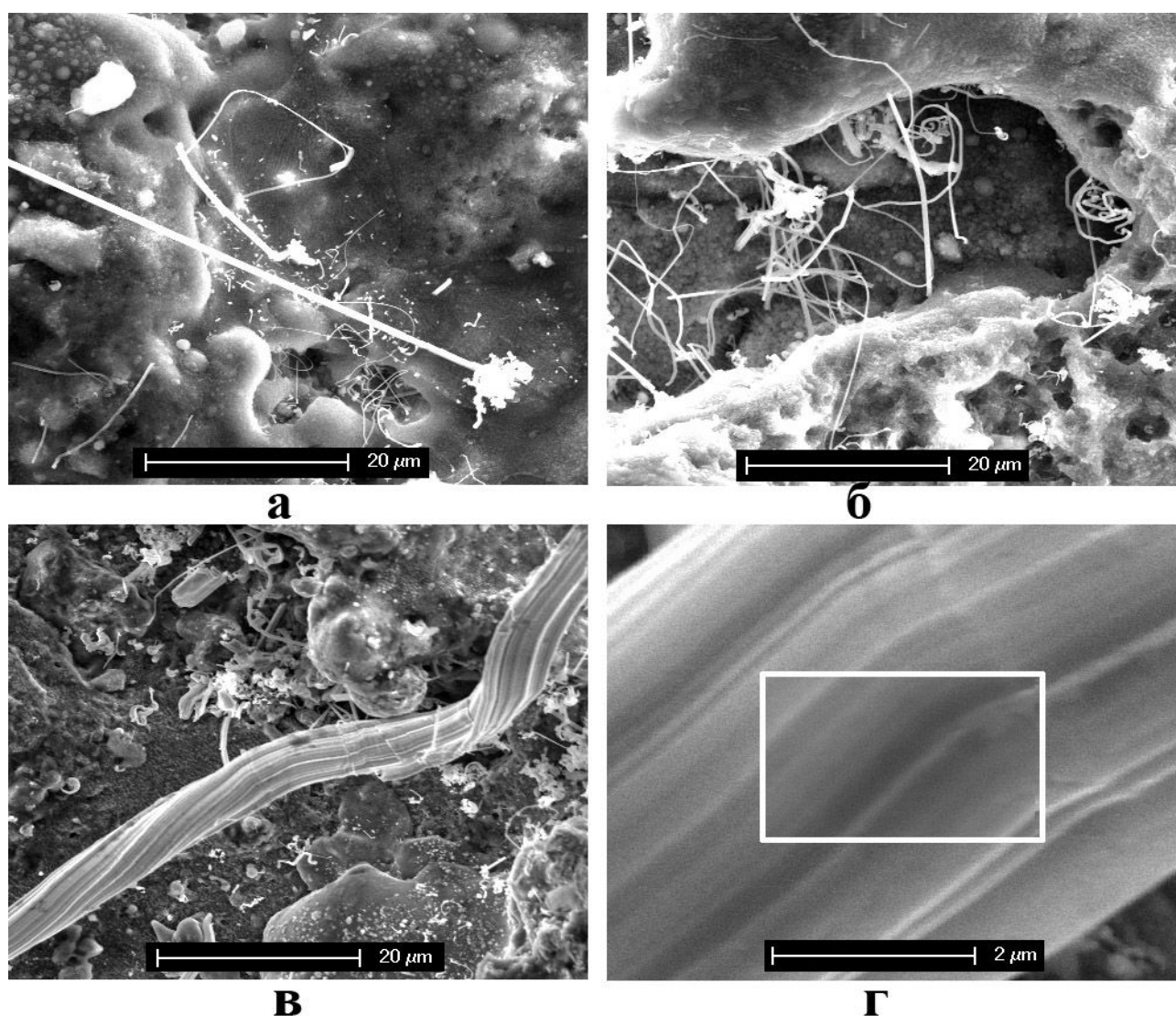


Рис.3.12. Морфология поверхностных слоев, полученных по режиму I, при скорости перемещения обрабатывающего электрода $0,6 \cdot 10^{-3}$ м/с (а, б), $1 \cdot 10^{-3}$ м/с (в, г).

Можно предположить, что при вытягивании нити под действием электромагнитных сил, действующих в межэлектродном промежутке, поверхность нити окисляется, а сердцевина остаётся не окисленной. В таком виде нить и попадает на поверхность образца, сплавляясь с материалом образца в единое целое. Соотношение в нити металлического олова и оксида на её поверхности будет зависеть от многих причин, в том числе от размеров сетки олова в структуре обрабатывающего электрода, от режимов обработки электроискрового легирования, от скорости перемещения электрода по поверхности образца и т.д.

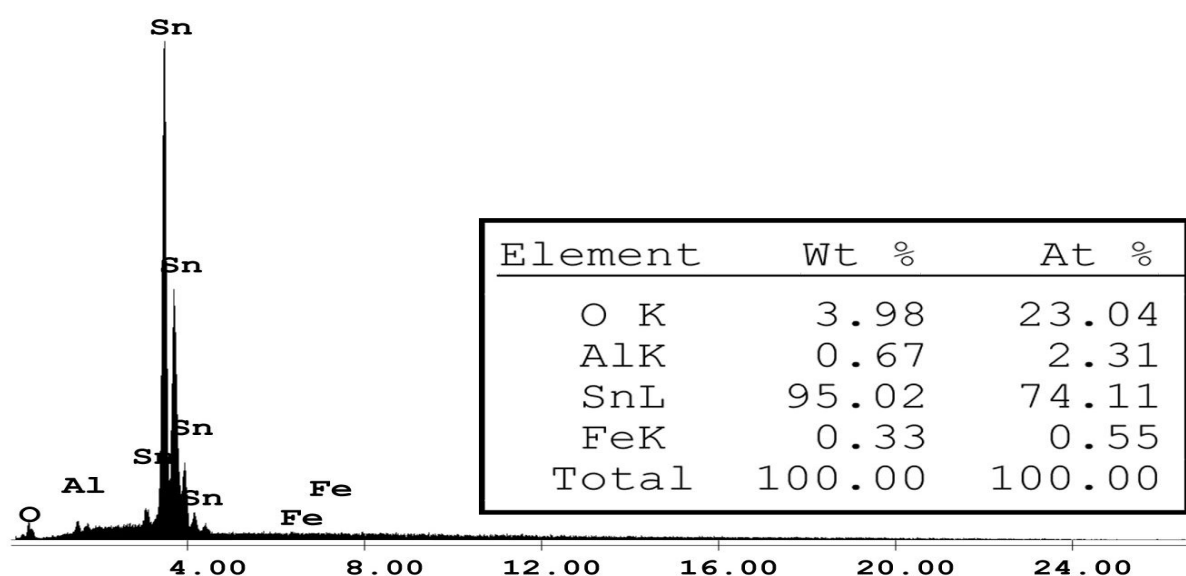


Рис 3.13. EDX-спектр и элементный состав участка поверхности, выделенного на рис.3.12

Вполне очевидно, что изменение элементного состава нити должно приводить к изменению свойств поверхности образца или детали. Элементный состав поверхности вокруг нити показывает, что она представляет собой смесь оксидов и нитридов алюминия и олова с разным содержанием самих этих элементов в зависимости от режимов обработки установки для электроискрового легирования.

3.3 Заключение и выводы.

В результате проведения экспериментов по нанесению покрытий с помощью электроискрового легирования на сплав Д1 обрабатывающими электродами из Al-Sn установлено:

1. При низкой энергии импульсов $J < 0,8$ Дж покрытия на алюминиевом сплаве Д1 с приращением слоя не образуются из-за сильного уноса материала с образца (катода),

поверхность образца только модифицируется. Приращение слоя происходит при повышении энергии импульсов до $J > 0,8$ Дж.

2. При нанесении покрытий обнаружено появление микро - и нано нитей, содержащих преимущественно оксиды олова, образующиеся в результате действия электромагнитных сил.

3. Показано, что микро - и нано нити переносятся на поверхность образца, образуя покрытие с измененными свойствами. Полученные микро - и нано нити играют роль «арматуры», связывающей покрытие в слой и способствующей его приращению, что дает возможность использования таких покрытий для восстановления изношенных деталей.

4. ФИЗИКО – МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОДАМИ Al-Sn

4.1 Механические свойства покрытий, полученных на сплаве Д1 с помощью электроискрового легирования.

С целью изучения возможности применения полученных покрытий в практике восстановления изношенных поверхностей и, в частности, при восстановлении изношенных деталей из алюминиевых сплавов, были проведены исследования их механических свойств: износостойкости, микротвёрдости и шероховатости.

Изучены свойства покрытий при трении скольжения:

а) полученных при возвратно-поступательном движении контртела:

- в условиях ручного режима нанесения покрытия (при трении в масле);
- в условиях механизированного нанесения покрытия (при трении в масле);
- в условиях механизированного нанесения покрытия (в условиях трения без смазки);

б) полученных при трении скольжения по схеме «диск – колодка» (при трении в смазочно-охлаждающей жидкости и трении без смазки).

4.1.1. Механические свойства покрытий, полученных в режиме нанесения покрытия вручную.

Для определения качества покрытий, полученных с помощью электроискрового легирования электродом из сплава Al-Sn на образцы из алюминиевого сплава Д1 были проведены испытания твердости, шероховатости и износостойкости по методике, изложенной в главе 3. Для сравнения, испытаниям на износостойкость подвергались и образцы без покрытий. Результаты испытаний приведены в Приложении 1, (таб. 2). Во время испытаний на износостойкость фиксировались следующие параметры:

- шероховатость покрытия после притирки $R_a^{пр}$;
- износ покрытия во время притирки $\Delta U^{пр}$;
- коэффициент трения в конце процесса притирки f ;
- шероховатость покрытия в конце испытания на износостойкость $R_a^{кон}$;
- износ покрытия за время испытания ΔU^0 ;
- износ контртела $\Delta U^{кт}$;
- коэффициент трения в конце испытания на износостойкость $f^{кон}$.

-коэффициент износа U .

Испытания на износостойкость, проведенные по вышеописанной методике (гл.2) показали, что образцы из алюминиевого сплава Д1 с покрытием, полученным с помощью электроискрового 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.4.1), из которой изготовлено контртело.

Таблица 4.1.

Результаты износных испытаний при наличии смазки.

Исходная шероховатость R_a , мкм	Притирка		Испытание			
	Шероховатость после притирки R_{ad} , мкм	Износ по времени притирки, $\Delta U_{пр}$, мг	Шероховатость покрытия после испытания, $R_{ал}$, мкм	Износ покрытия за время испытания, ΔU , мг	Износ контртела за время испытания, ΔU , мг	Коэффициент $U = \Delta U_{кт} / \Delta U$
Без покрытия методом электроискрового легирования						
0,72	0,32	69,40	-	67,90	0,40	0,005
0,52	0,17	28,30	-	86,30	4,30	0,05
С покрытием методом электроискрового легирования						
18,90	10,9	0,25	7,5	6,05	37,15	6,14
15,10	8,6	3,0	5,8	5,10	32,00	6,39

Максимальный износ образцов из сплава Д1 наблюдается для необработанной электроискровым легированием поверхности (таб.4.1). 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 (табл.4.2, Приложение1,таб.4), что это предположение не оправдалось.

Таблица 4.2

Микротвердость HV покрытия и контртела (кг/мм²).

Образец из Д1 до покрытия					Образец из Д1 с покрытием			
№ п/п	1	2	3	4	1	2	3	4
HV100	91,6	81,7	89,0	91	68	57	66	61
Контртело из закалённой стали								
HV200	593				549			

Видно, что микротвёрдость основы - сплава Д1 без покрытия - составила в среднем HV 88 ± 4 кг/мм², а с покрытием – 63 ± 5 кг/мм². При этом микротвёрдость контртела составила в среднем HV 571 кг/мм², что в ~ 9 раз превышает твердость покрытия. Однако при этом контртело изнашивается по величине на порядок больше, чем покрытие.

Для того чтобы определить, как влияет износ на микротвердость покрытия была проведена следующая серия испытаний на микротвердость образцов, прошедших испытания на износ (Приложение1,таб.5). Микротвердость основы – сплава Д1 без покрытия - составила в среднем HV 100кг/мм², а микротвердость покрытия в среднем – 77,3 кг/мм², т.е. повышение микротвердости после испытания на износостойкость в масле не обнаружено.

В связи с такой аномально большой износостойкостью покрытия, полученного методом электроискрового легирования, было сделано предположение, что в покрытии присутствуют оксиды алюминия Al₂O₃, твердость которых, как известно, составляет HV 1200 кг/мм². [2] Присутствие таких оксидов в покрытии даже в небольших количествах могло бы увеличить износостойкость покрытия. Элементный анализ покрытия с помощью приставки INGA Energy EDX (Oxford, Великобритания) к электронному микроскопу TESCAN показал наличие в покрытии кислорода в количестве 7÷8%. Кислород в покрытии может присутствовать, естественно, только в виде оксидов. Для проверки предположения о наличии оксидов на образцы из сплава Д1 было нанесено покрытие из чистого алюминия и определена износостойкость (таб. 4.3.) по методике, изложенной выше.

Таблица 4.3

Результаты экспериментов по определению износостойкости покрытия из чистого алюминия на сплаве Д1.

№ п/п	Материал $\frac{ЭИ}{\text{подложка}}$	R _a , мкм	R _{al} , мкм	R _{ал} , мкм	ΔU, мг	ΔU _{кт} , мг	Коэффициент $U = \Delta U_{\text{кт}} / \Delta U$
1	$\frac{Al}{Д1}$	0,72±0,08	0,32±0,21	0,25±0,15	137,3	0,4	3·10 ⁻³
2	$\frac{Al}{Д1}$	0,52±0,25	0,17±0,08	0,20±0,10	114,3	4,3	4·10 ⁻²

Испытания показали, что при покрытии с помощью электроискрового легирования сплава Д1 чистым алюминием, когда возможность образования окислов алюминия особенно велика, и, следовательно, износостойкость покрытия должна по сравнению с покрытием из сплава Al-Sn, значительно возрасти, этого не произошло. Износ составил в среднем 120 мг, что вдвое превышает износ образца из сплава Д1 без покрытия. Этот эксперимент косвенно подтверждает тот факт, что окислы алюминия не играют значительной роли в повышении износостойкости образцов из Д1.

Рентгенофазовый анализ покрытия, проведенный по методике, изложенной в [176], показал отсутствие каких-либо окислов в покрытии, в том числе и оксидов алюминия, что свидетельствует о том, что эти окислы находятся в аморфном состоянии.

По результатам этого анализа было высказано предположение, что окислы в покрытии находятся в виде микро – и нанонитей, равномерно расположенных в алюминиево-оловянной матрице. Наличие микро- и нанонитей в покрытии подтверждается на микрофотографиях (рис 3.6), полученных на электронном микроскопе TESCAN. Элементный анализ микро – и нанонитей, проведенный с помощью приставки EDX к электронному микроскопу показал, что это, в основном, оксиды олова (таб. 4.4). При этом следует учесть, что наличие Al в микро –и нанонитях, очевидно, обусловлено особенностями измерений элементного состава, при которых анализируются не только микро – и нанонити, но и частично Al матрицы.

Таблица 4.4

Состав микро – и нанонитей в покрытии.

Элемент	Sn	Al	O	N
Весовые %	61,5	19,1	11,5	4,9

В результате проведенных экспериментов можно предположить, что аномальная износостойкость покрытия сплава Д1 электродами из сплава Al-Sn обеспечивается окислами олова SnO_2 , твердость которых может достигать 1200 кг/мм^2 [6].

Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по нанесению с помощью электроискрового легирования покрытий на сплав Д1 электродами из Al-Sn в среде аргона, когда возможность образования окислов олова и алюминия в виде нанонитей отсутствует. Результаты износных испытаний приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5.

Результаты износных испытаний после проведения электроискрового легирования в различной атмосфере.

№ п/п	Материал <i>ЭИ</i> <i>подложка</i>	Режим	Атмосфера	Время обработки, мин.	ΔU , мг	$\Delta U_{\text{кт}}$, мг	Коэффициент $U = \Delta U_{\text{кт}} / \Delta U$
1	Al-Sn /Д1	4	аргон	2	13,0	1,9	0,15
2	Al-Sn /Д1	6	аргон	2	44,9	1,15	0,03
3	Sn/Д1	2	воздух	4	12,9	1,5	0,12
4	Sn/Д1	4	воздух	2	8,6	0,4	0,05

Результаты износных испытаний образцов 1 и 2 (табл.4.5.) позволяют заключить, что износ покрытия существенно превышает износ контртела. Таким образом, при нанесении покрытий в условиях отсутствия кислорода и невозможности образования окислов олова, износостойкость покрытия становится низкой и приближается по величине к износостойкости образца без покрытия.

Нанесение покрытий из чистого олова (образцы 3,4 табл.4.5.) на образец из сплава Д1 и проведение износных испытаний также показало, что износ покрытия в несколько раз больше износа контртела. Это можно объяснить только тем, что изменение условий электроискрового легирования, в частности, отдельное легирование Al и Sn, привело к тому, что нанонити не образуются. Становится очевидным, что основным фактором,

обуславливающим появление в покрытии нанонитей, является состав и структура использованного обрабатывающего электрода.

Таким образом становится очевидным, что определяющую роль в наблюдаемом эффекте аномально высокой степени износа контртела из закаленной стали при контакте с обработанной методом электроискрового легирования поверхностью алюминиевого сплава Д1 играет образование нанонитей не олова, а его оксида, поскольку при получении покрытий в атмосфере аргона подобного эффекта не наблюдается.

Эффект повышения износостойкости покрытия из Al-Sn кажется аномальным в силу следующих причин:

1. Классические измерения микротвердости покрытий, полученных на сплаве Д1 с помощью электроискрового легирования, показали, что микротвердость их практически не отличается от микротвердости основы ($HV \sim 65-80 \text{ кг/мм}^2$).

2. Рентгенофазовый анализ не обнаружил ни оксидов олова, ни оксидов алюминия, что можно объяснить либо аморфным их состоянием, либо применительно к нанонитям из SnO_2 низкой их концентрацией.

Объяснить всю совокупность полученных результатов можно лишь предположив, что полученное покрытие представляет собой поверхность алюминиевого сплава с вкрапленными в него нанонитями SnO_2 , которые и определяют свойства поверхности, обеспечивающие преимущественный износ контртела из закаленной стали.

Тот факт, что свойства покрытия практически не изменяются после частичного удаления поверхностного слоя при шлифовке в 0,2 мм, свидетельствует о том, что нанонити образуются по всему объему покрытия, а не только в поверхностном слое, как это было обнаружено ранее. Исследования показали также, что нанонити образуются при разных режимах электроискрового легирования, но при более интенсивных режимах (при использовании установки ALIER-31 режимы 5-6) их концентрация в покрытии больше.

В результате проведенных экспериментов можно утверждать, что обнаружен эффект аномального износа контртела из закаленной стали при испытаниях покрытий, полученных электроискровым легированием алюминиевого сплава электродом-инструментом из сплава Al-Sn. Поскольку при обработке обрабатываемыми электродами из индивидуальных компонентов (Al и Sn) подобного эффекта не наблюдается, очевидно, что причина его возникновения обусловлена включением в состав покрытия нанонитей, обладающих специфическими механическими свойствами. Отсутствие описанного выше эффекта при обработке в атмосфере аргона свидетельствует, что легкоплавкий компонент переносится в покрытие в виде нанонитей из оксида олова.

При проведении испытаний было обнаружено (рис 4.1), что износ контртела при испытании не обработанных методом электроискрового легирования образцов составляет $0,5 \div 7$ мг, а при испытании покрытий из Al-Sn составляет в среднем $20 \div 50$ мг, т.е. почти на порядок величины больше.

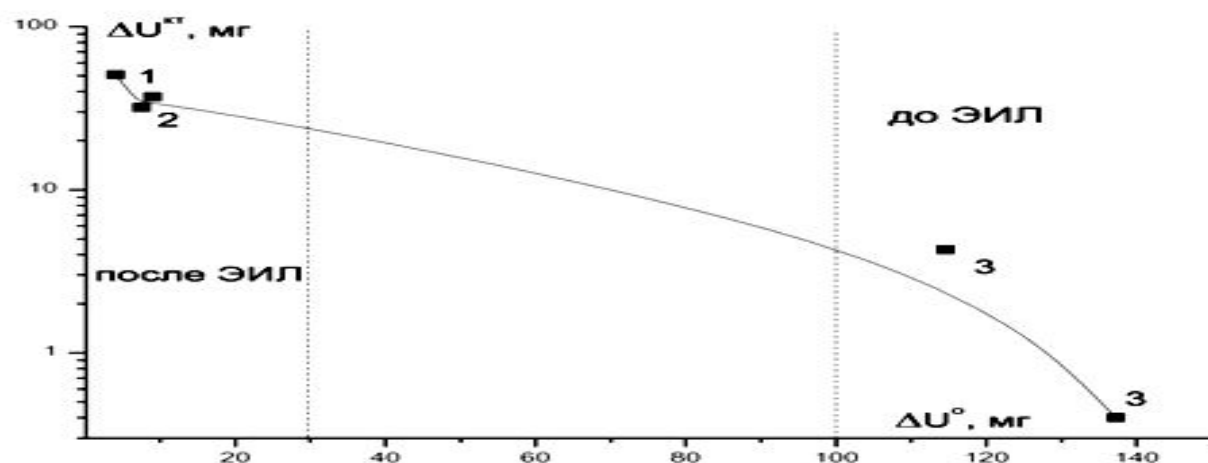


Рис 4.1. Зависимость износа контртела от степени износа образца после обработки в режиме 6 (1), 4 (2) и необработанных образцов (3).

Износ контртела зависит от исходной шероховатости покрытия, причем эта зависимость – нелинейная (приложение 1 таблица 3, рис. 4.2). При низкой шероховатости износ контртела небольшой, а при ее увеличении до $Ra \approx 12$ мкм и более резко возрастает, достигая 5-6 кратной величины.

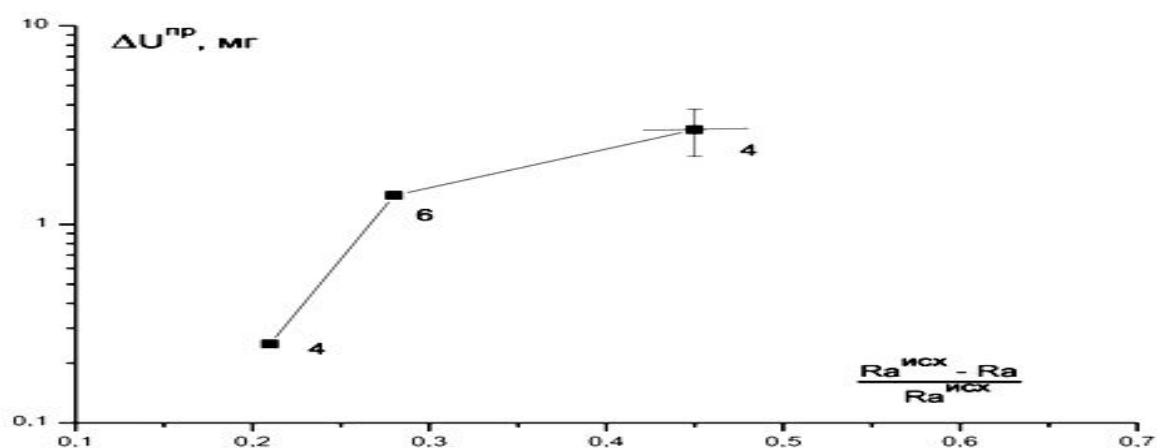


Рис.4.2. Зависимость величины износа образца после «притирки» от относительного изменения шероховатости в процессе «притирки». Цифры около точек соответствуют режимам обработки.

В результате проведения испытаний по определению износостойкости и микротвердости, получаемых при электроискровом легировании поверхностей, можно сделать следующие выводы:

1. Износ контртела (твердость $HRC \sim 60$ ед.) превысил износ образца с покрытием примерно в 10 раз, что говорит о высокой износостойкости покрытия.
2. Износостойкость покрытия, полученного с помощью электроискрового легирования на алюминиевом сплаве Д1 с помощью электродов из алюминиево-оловянного сплава Al-Sn на порядок превышает износостойкость сплава Д1 без покрытия.
3. Измерения микротвердости покрытия после электроискрового легирования показали, что она либо равна микротвердости основы – сплава Д1, либо на $5 \div 20$ % ее ниже.
4. Рентгенофазовый анализ не показал наличия окислов металлов в покрытии, что дает основание предположить присутствие окислов в аморфном состоянии или в виде микро – и нанонитей.

4.1.2. Свойства покрытий, полученных в условиях механизированного нанесения.

Из представленных в таблице 1 (см. Приложение 1) данных видно, что потеря в весе используемых контртел в разы превышает потери в весе исследуемых образцов. Отношение изменения массы исследуемых контртел к изменению массы соответствующих образцов варьируется в пределах от 0,52 до 3,4. Это означает, что износостойкость соответствующего образца при скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно поверхности $V=2,0 \cdot 10^{-3}$ м/с до 3,4 раз превышает износостойкость контртела, изготовленного из закаленной инструментальной стали. Максимальное значение увеличения износа контртела в сравнении с износом покрытия наблюдается в области значений скоростей перемещения обрабатывающего электрода, равных $(0,6 \div 1) \cdot 10^{-3}$ м/с. В некоторых случаях при испытаниях происходило увеличение веса образца, что связано с тем, что материал контртела, разрушаясь, «намазывается» на поверхность образца. При получении обрабатываемой поверхности в условиях «обыскивания», высокая износостойкость получается при минимальной шероховатости.

Таким образом, можно сделать принципиально важный вывод: условие получения максимальной шероховатости поверхности и максимального привеса при электроискровом легировании не является необходимым условием максимальной износостойкости образца. Из таблицы 1 приложения 1 и представленных графиков на рисунке 4.3 видно, что при достижении максимальной шероховатости и максимального привеса при электроискровом

легировании (опыты при $V=0,3 \cdot 10^{-3}$ м/с рис. 4.3 с максимальным привесом и шероховатостью покрытия) не достигается максимальная износостойкость поверхности. В этих случаях отношение износа контртела к износу покрытия приблизительно равно 1. При других скоростях движения обрабатывающего электрода наблюдаемая износостойкость поверхности покрытия существенно выше. Она может быть высокой, когда происходит только «обвыскивание» поверхности, при котором привеса практически не наблюдается, но свойства поверхности кардинальным образом изменяются в результате её модифицирования.

Из полученных результатов видно, что износ поверхности образца по сравнению со степенью износа контртела существенно меньше в условиях приработки, чем при основных испытаниях. Это связано с двумя причинами. Первая из них заключается в том, что в условиях приработки используется меньшая нагрузка. Это означает, что эффект высокой износостойкости образца по сравнению с износостойкостью закаленной стали, должен увеличиваться при малых нагрузках.

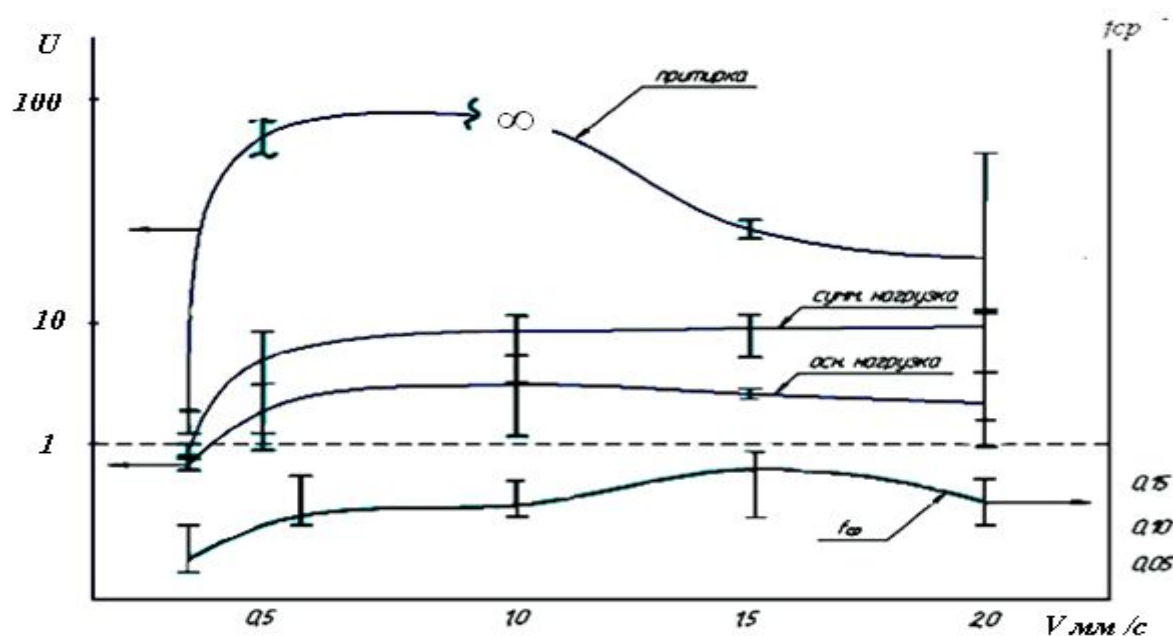


Рисунок 4.3 Зависимость коэффициента износа U и коэффициента трения f от скорости V перемещения обрабатывающего электрода относительно поверхности образца.

Вторая причина заключается в том, что основные испытания проводились в условиях, когда верхний поверхностный слой образца был частично удален в процессе испытаний. Это означает, что максимальной износостойкостью обладают именно поверхностные слои, получаемые при электроискровом легировании сплавом Al-Sn.

Таким образом, можно заключить, что испытания в механизированном режиме не только подтвердили существование эффекта повышенной износостойкости легированных

поверхностей, но и позволили определить оптимальные условия её получения. Таким условием является «обыскивание» поверхности без существенного массопереноса.

Все представленные результаты были получены в условиях использования вазелинового масла в качестве среды трения. Для полноты картины и более полного изучения свойств полученных покрытий дальнейшее исследование износостойкости проводились в условиях трения без смазки.

4.1.3. Износостойкость покрытий полученных методом электроискрового легирования при трении без смазки.

Испытания проводили по методике, описанной в главе 3, в которой использовались два режима. Первый – при постоянном числе слоев и второй – при постоянной величине энергозатрат.

На рис. 4.4 представлена зависимость удельной скорости обработки от скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно обрабатываемой поверхности. Видно, что, несмотря на разброс экспериментальных данных и принципиально различные методы обработки, удельная скорость обработки остается постоянной в определенном интервале скоростей перемещения обрабатывающего электрода. Она равна $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ мг/с см² при малых скоростях перемещения обрабатывающего электрода и $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ мг/с см² при высоких. Переход от обработки по методу 1 к обработке по методу 2 меняет только то «критическое» значение скорости перемещения обрабатывающего электрода, при котором наблюдается переход от режима электроискрового легирования, сопровождающегося привесом образца, подвергаемого обработке (режим I, к режиму, при котором имеет место потеря в весе после электроискрового легирования (режим «обыскивания» или режим II).

4.1.3.1 Износные испытания поверхностей, обработанных по режиму 1 (постоянное число слоев).

Результаты износных испытаний показали, что величина коэффициента износа U при условии, что обработка происходит в режиме I (то есть при наращивании поверхности), действительно может быть больше единицы (скорость износа контртела превышала в 2-3 раза скорость износа обработанной поверхности, рис.4.5). После 1 часа испытаний износ контртела почти на порядок мог превышать износ обработанной поверхности (рис.4.5).

Однако при более высоких значениях скорости перемещения обрабатывающего электрода эффект не наблюдался. Переход от значений $U_{кт} > 1$ к значениям $U_{ктБ} < 1$ происходит при

таких скоростях перемещения электрода по поверхности образца, при которых наблюдается переход к режиму «обсыкивания» т.е. без получения приращения слоя покрытия (рис.4.5).

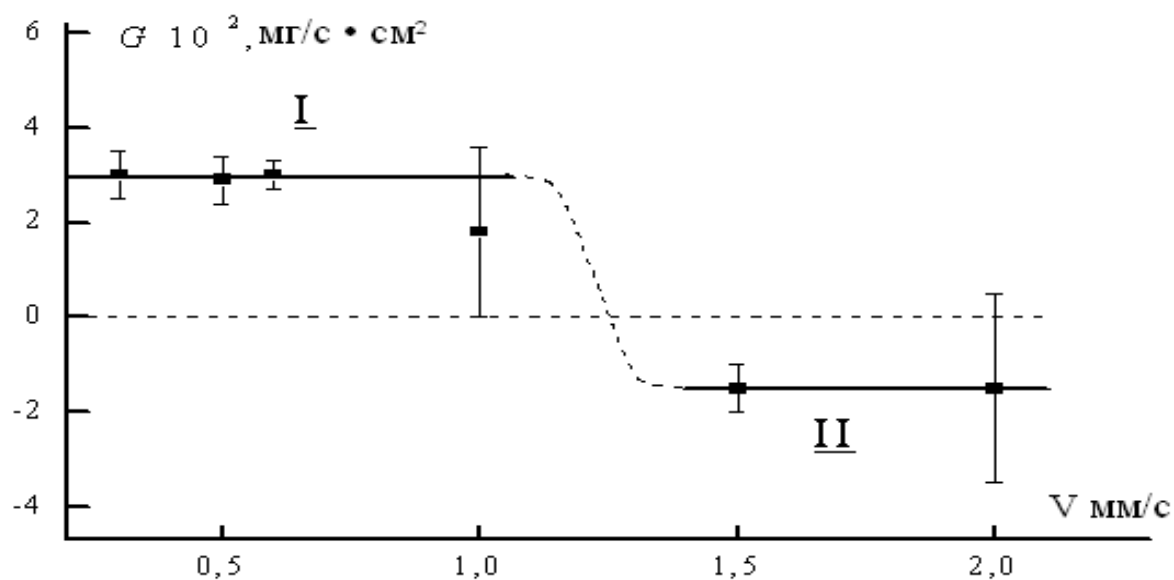


Рис.4.4. Зависимость скорости обработки от скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно обрабатываемой поверхности.

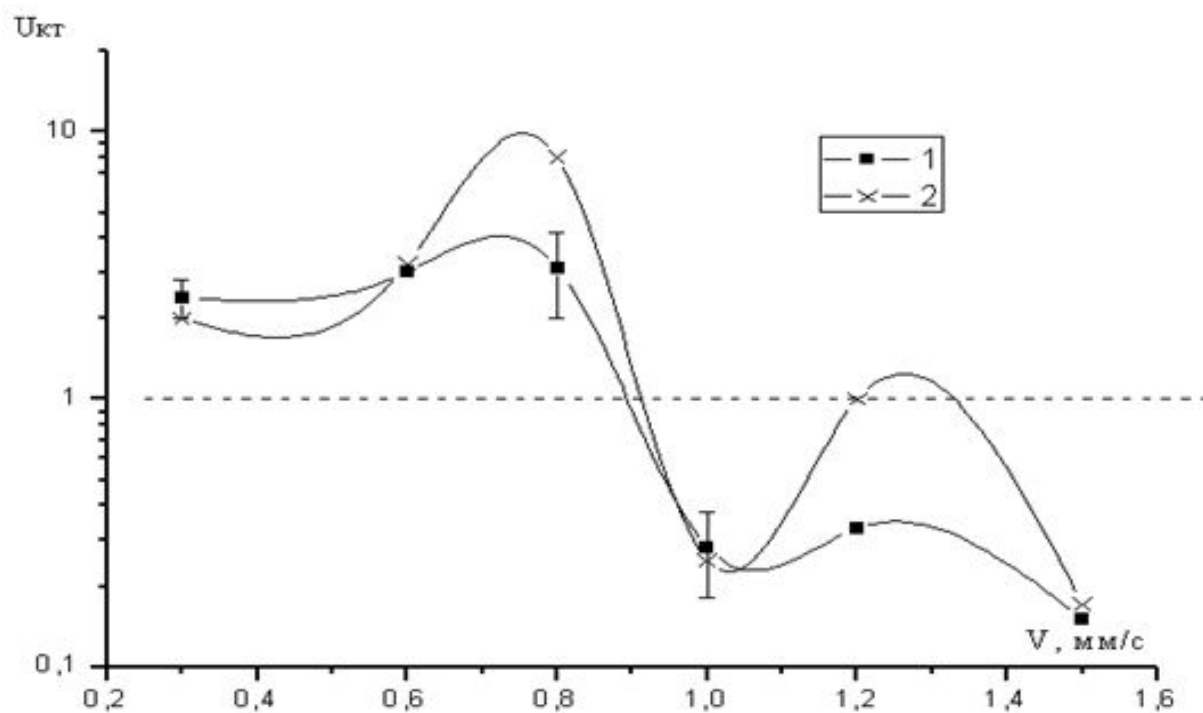


Рис.4.5. Зависимость относительной скорости износа контртела из закаленной стали от скорости перемещения обрабатывающего электрода после 5 часов (1) и 1 часа (2) испытаний.

4.1.3.2 Износные испытания поверхностей, обработанных по режиму 2 (постоянство энергии, вводимой в искровой промежуток за время обработки).

Как показано выше, шероховатость поверхности образца при электроискровом легировании зависит от скорости перемещения электрода относительно поверхности. Для поверхностей обработанные по режиму 2 во всех случаях наблюдается эффект превышения износа контртела над износом обработанной поверхности. Для поверхностей, полученных в режиме “обыскивания” эффект превышения максимален и почти на порядок превышает износ поверхности, обработанной электроискровым легированием по режиму 1 (рис.4.6).

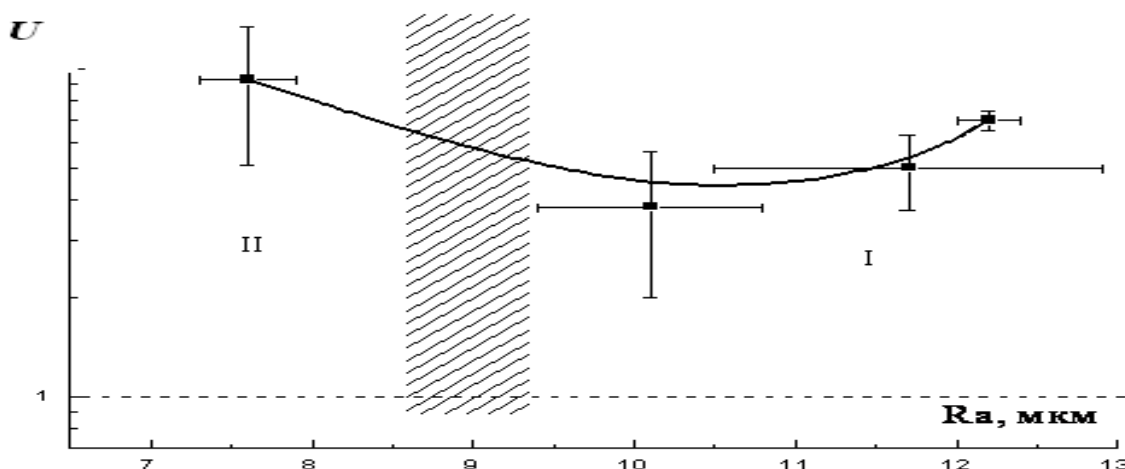


Рис.4.6. Зависимость относительного износа контртела от шероховатости поверхности, полученной после электроискрового легирования для поверхностей, обработанных по режиму 2.

Сопоставление результатов, приведенных на рис.4.5 и 4.6, показывает, что при таком варианте обработки переход к режиму II сопровождается:

- наличием потери в весе после обработки образца;
- уменьшением шероховатости поверхности образца;
- достижением максимальных значений коэффициента износа U .

В Приложении 1 таб.6 приведены значения абсолютного износа и коэффициента износа U . При тестовых износных испытаниях в начальные периоды значения U могут достигать величин, существенно превышающих значения U , полученные после 5 часов испытаний. При этом шероховатость поверхности:

- является минимальной в сравнении с поверхностями, полученными при всех иных вариантах обработки;
- мало изменяется в процессе износных испытаний (Приложение 1 таб.6).

При обработке же в режиме наращивания поверхностного слоя увеличение U наблюдается при росте шероховатости поверхности после обработки (рис.4.6).

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что эффект существенного превышения износа контртела из закаленной стали в сравнении с износом поверхности из алюминиевого сплава, легированного обрабатывающим электродом из сплава Al-Sn и обусловленный наличием микро – и нанонитей из SnO_2 на обработанной поверхности, наблюдается как при трении в масле, так и при трении без смазки [167,168] при различных режимах и методах обработки. Однако в условиях сухого трения он достигает максимальной величины при обработке поверхности в режиме “обыскивания” и постоянстве энергозатрат в искровой промежуток (то есть при высоких скоростях перемещения обрабатывающего электрода относительно образца и относительно увеличенной длительности электроискрового воздействия на обрабатываемую поверхность).

Полученные результаты могут служить основой создания высокоэффективных, возобновляемых антифрикционных покрытий на разных, преимущественно алюминиевых сплавах.

В тестовых испытаниях переход от режима обработки I к режиму II изменяет зависимость коэффициента трения от условий получения покрытий (рис.4.7). При получении покрытий в режиме I коэффициент трения возрастает в зависимости от увеличения скорости V , а для покрытий, полученных в режиме II, падает (рис.4.7).

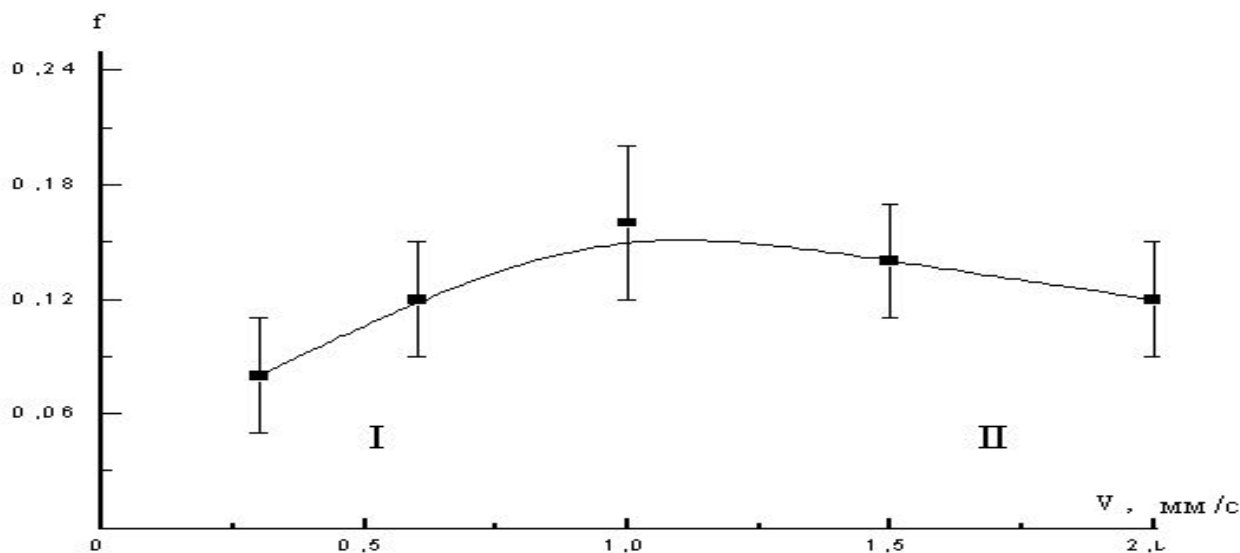


Рис.4.7. Изменение коэффициента трения обработанных поверхностей (контртело-закаленная сталь) в зависимости от условий получения покрытий ($V = 0,3 - 1,0$ мм/с – режим I, $V = 1,0 - 2$ мм/с – режим II).

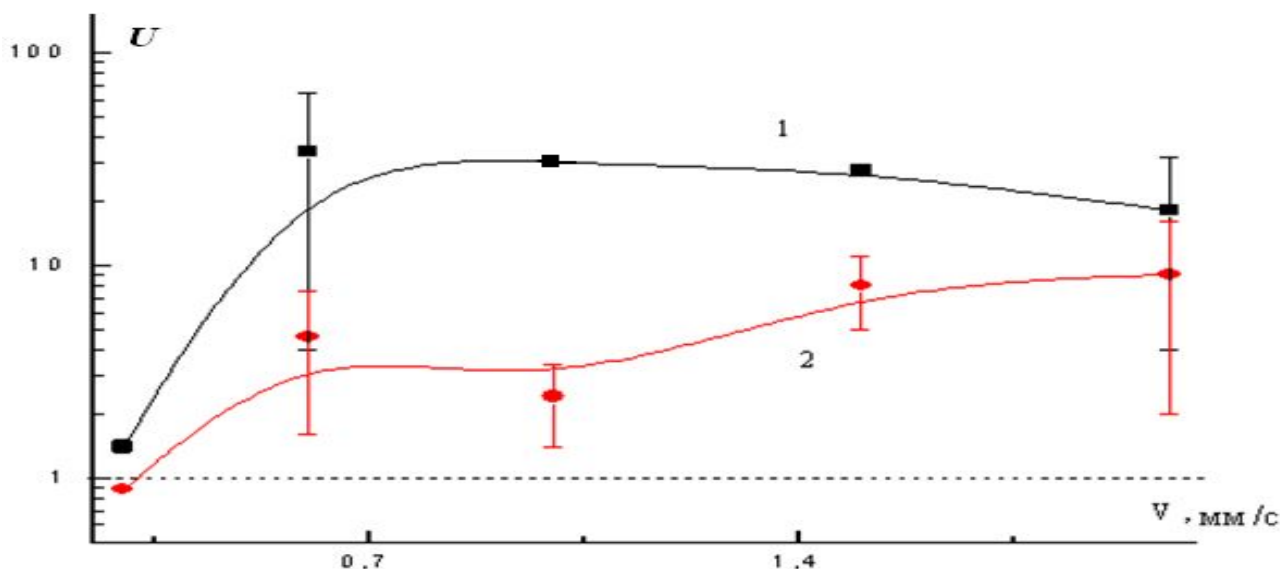


Рис.4.8. Влияние скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно обрабатываемой поверхности на величину относительного износа контртела при трении в масле с обработанными методом электроискрового легирования поверхностями после приработки (1) и после двух этапов испытаний (2).

Шероховатость, а также измерения веса образца и контртела проводились как после первого этапа испытаний (с меньшей нагрузкой), так и после окончания испытаний (рис.4.9).

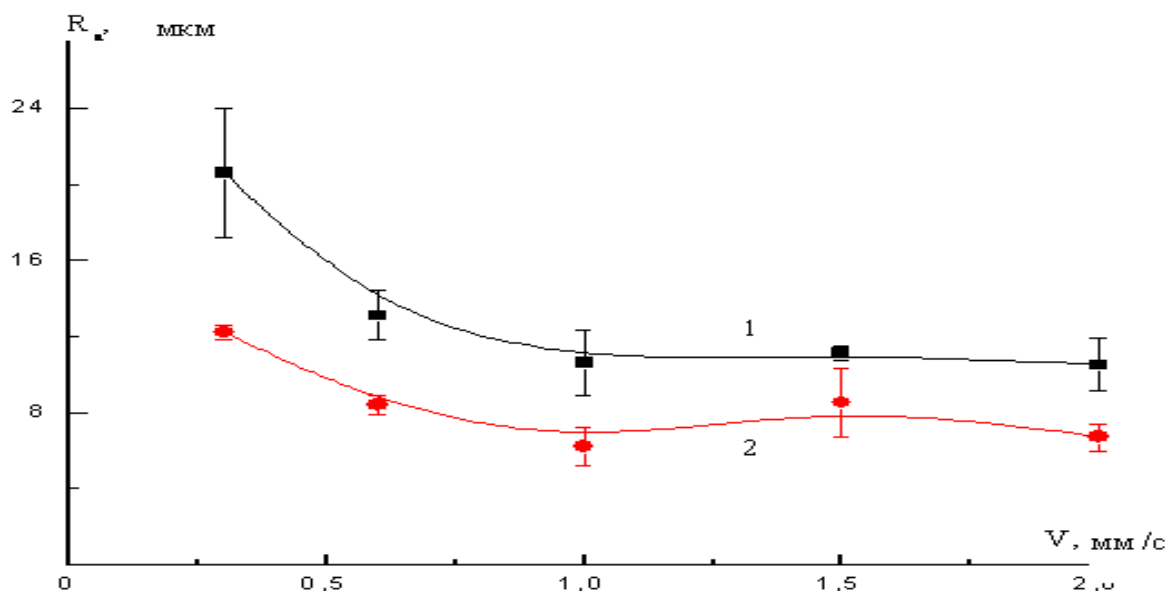


Рис.4.9. Изменение шероховатости поверхностей, полученных после электроискрового легирования (1) и после износных испытаний (2) в зависимости от скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно обрабатываемой поверхности при получении покрытий.

Результаты, представленные на рис. 4.8, 4.9, позволяют заключить:

- в условиях механизированного нанесения электроискровых покрытий также наблюдается эффект аномального износа контртела из закаленной стали;

- эффект наблюдается независимо от того, происходит ли приращение слоя (режим I) или обработка происходит с потерей в весе обрабатываемой поверхности (режим II “обыскивание”).

Действительно, при испытаниях покрытий с максимальной шероховатостью ($V = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м/с) износ контртела близок к величине износа покрытия, в то время как для покрытий, полученных при более высоких скоростях перемещения обрабатывающего электрода, износ контртела на порядок и более превышает износ покрытия (рис.4.9).

Следует отметить, что при переходе от приработки к основному этапу износных испытаний, значения U уменьшались (рис.4.9), однако сам эффект наблюдался независимо от условий тестовых испытаний.

4.1.4. Износостойкость покрытий при испытании по схеме «ролик-колодка»

Для того, чтобы определить свойства покрытий в широком диапазоне нагрузок, в том числе при «жестких» режимах, были проведены испытания на износостойкость образцов сплава Д1 по методике, приведенной в главе 3, на машине трения СМЦ-2 в Трибологическом центре (г. Каунас, Литва).

Испытания проводились без смазки и в смазочно-охлаждающей жидкости.

Результаты испытаний на износостойкость образцов с покрытиями и без, на машине трения приведены на рис.4.10 ÷ 4.14

На рис. 4.10. приведены результаты сравнительных испытаний образцов при трении в смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ):

- без покрытия;
- с нанесением 4 слоев чистого Al;
- с нанесением 4, 8, 12, 24 слоев с покрытием из сплава Al-Sn.

Самый большой износ получили образцы без покрытия - 115мг. При этом износ контртела - диска из закаленной стали - оказался самым низким 2,1 мг т.е. коэффициент износа составил $U=0,02$, т.е. диск практически не изнашивался.

Самую высокую износостойкость показало покрытие из 4 слоев чистого Al. Износ составил всего 0,8 мг, но при этом износ контртела составил значительную величину – 99 мг. Коэффициент износа $U = 124$. что говорит о том, что износ покрытия из чистого алюминия на два порядка меньше чем износ контртела из закаленной стали.

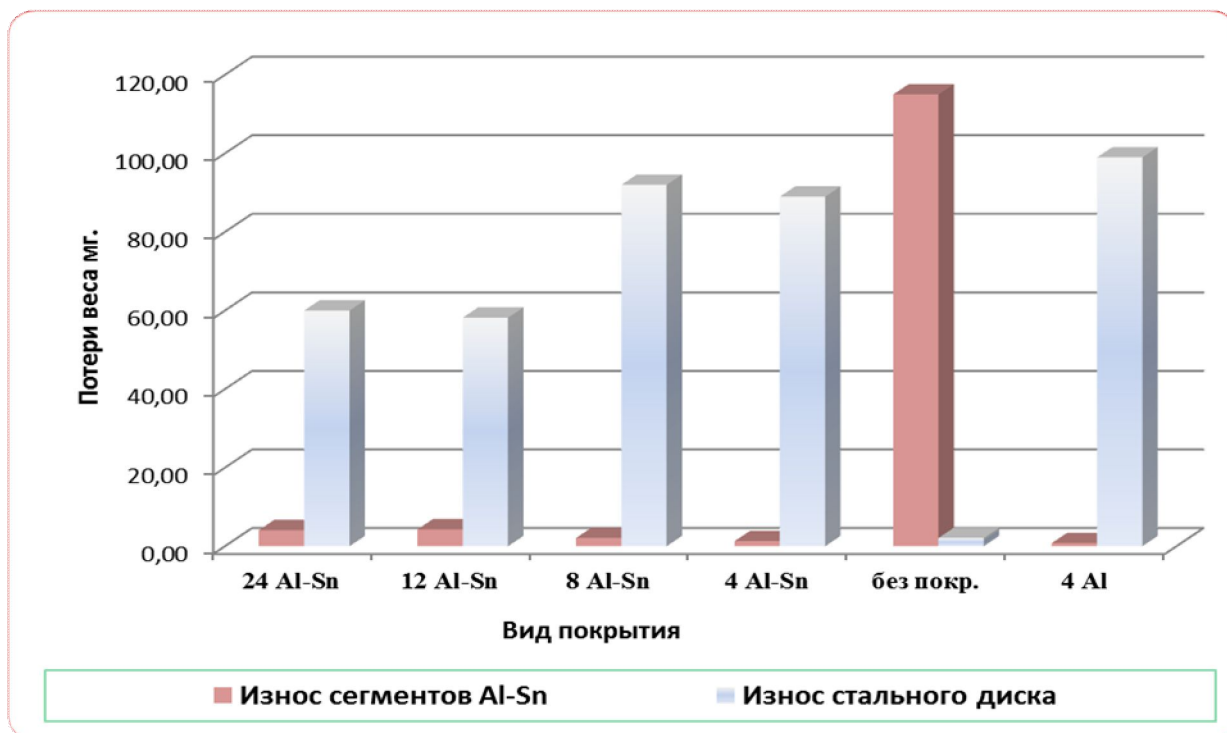


Рис. 4.10.. Результаты испытаний на износостойкость образцов после электроискрового легирования при параметрах: среда - СОЖ, при нагрузке 200 400 600 800 1000 Н в течение 15 мин на каждой, не обработанные раскаткой.

Образцы с покрытием из сплава Al-Sn также показали высокую износостойкость. Самая высокая износостойкость оказалась у образцов с покрытием из 4 слоев 1,3 мг, в то время как износ диска составил 89 мг (коэффициент износа $U=68$).

Несмотря на то, что коэффициент износа у покрытий из чистого алюминия выше, следует отметить, что при нанесении покрытия на сплав Д1 приращения слоя не происходит. Поверхность образца только модифицируется, т.е. износостойкий слой формируется непосредственно за счет материала образца и частично материала электрода.

В отличие от покрытий чистым алюминием, покрытие из сплава Al-Sn обеспечивает приращение слоя, т.е. увеличение размера образца.

Исходя из этого, можно сделать заключение, что, несмотря на высокую износостойкость, использовать покрытие чистым алюминием для восстановления алюминиевых деталей (например, посадочных мест под подшипники в корпусных деталях из алюминиевых сплавов) не представляется возможным.

Способ покрытия чистым алюминием можно рекомендовать либо для получения износостойких покрытий на новых деталях (особенно для тех, для которых чистота поверхности не играет особой роли), либо при получении комбинированных покрытий,

например: холодное газотермическое напыление и последующее электроискровое легирование электродами из чистого алюминия, или микродуговое оксидирование и электроискровое легирование. В отличие от покрытия чистым алюминием, при покрытии с помощью электроискрового легирования сплавом Al-Sn можно получить приращение слоя до $1,0 \cdot 10^{-3}$ м, поэтому такое покрытие можно использовать не только для восстановления изношенных деталей из алюминиевых сплавов, но и одновременно для их упрочнения.

Проведенные выше испытания показали, что износостойкость образцов с покрытиями из сплава Al-Sn в $10 \div 15$ раз выше износостойкости контртела из закаленной стали.

При увеличении количества слоев на образцах износ их увеличивается, но одновременно снижается износ контртела, так что коэффициент износа снижается до $U=15$, однако остается по сравнению с износом образцов без покрытия довольно высоким. Исследование показало (рис 4.11), что увеличение количества слоев приводит к увеличению шероховатости на поверхности образцов. Для того чтобы определить степень влияния шероховатости на результаты испытания образцов на износостойкость, часть образцов после электроискрового легирования была подвергнута механической обработке - раскатке с усилием прижима 100 Н.

С увеличением количества слоев (1) шероховатость увеличивается примерно на $10 \div 12\%$. При раскатке (2) шероховатость снизилась на $40 \div 45\%$ относительно исходной после электроискрового легирования.

Раскатанные образцы были испытаны на износостойкость при тех же условиях испытания, что и образцы на рис. 4.11

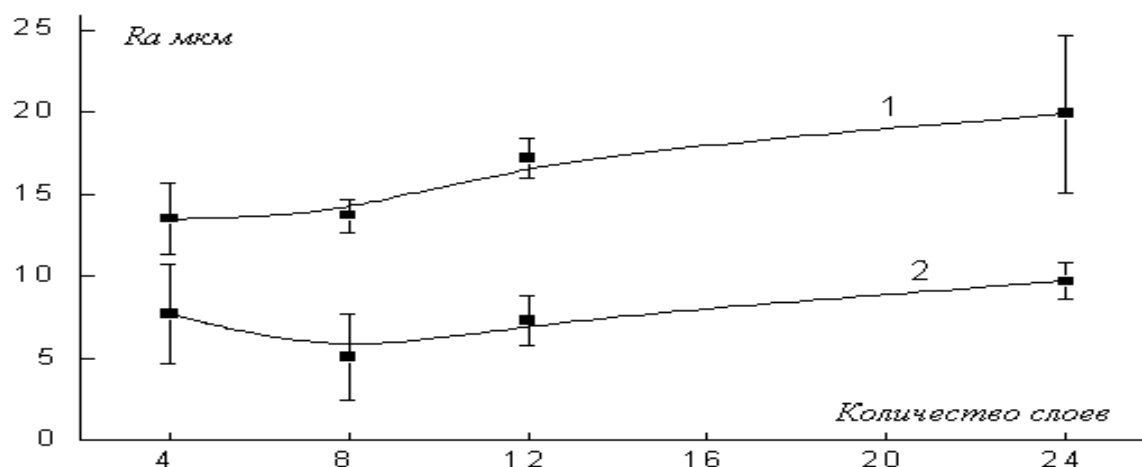


Рис. 4.11 Зависимость шероховатости поверхностей от количества слоев после электроискрового легирования (1) и после электроискрового легирования и механической деформации (раскатки) (2).

Результаты испытаний приведены на рис. 4.12

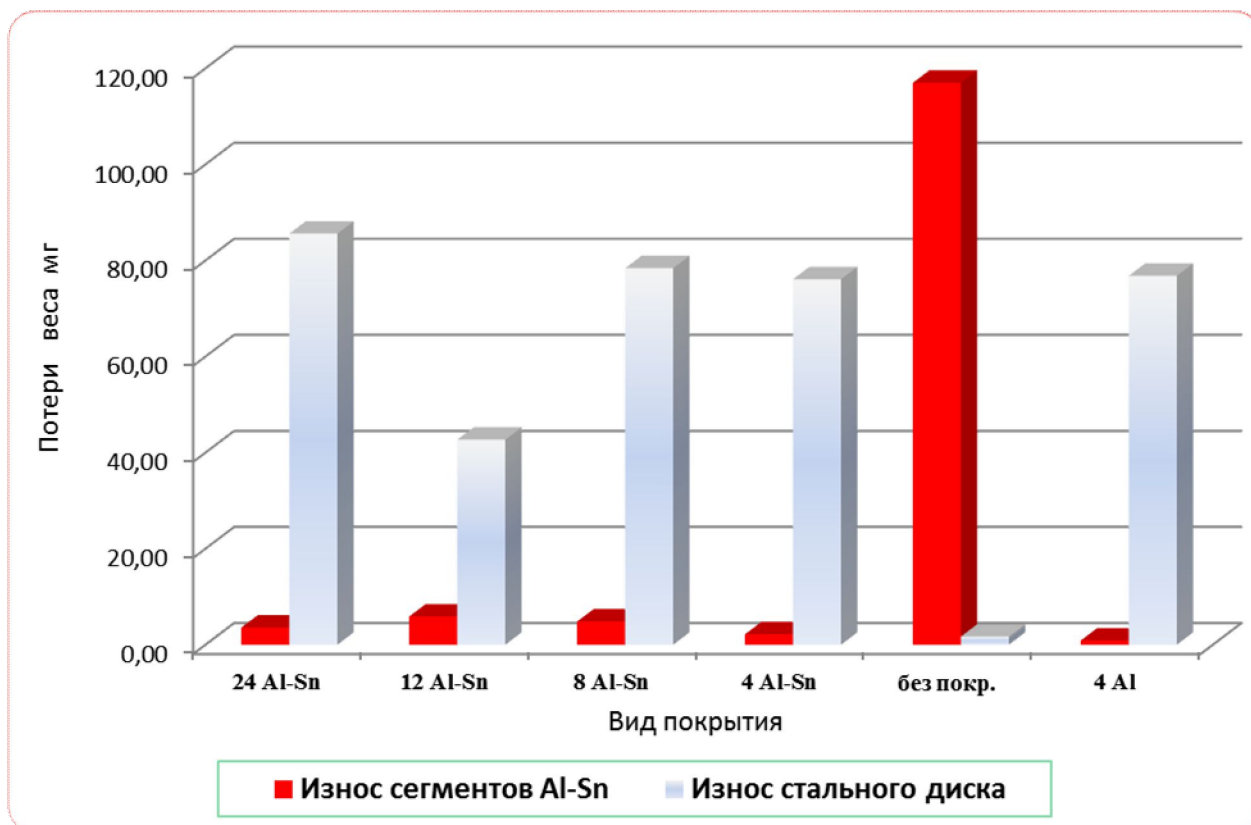


Рис. 4.12. Результаты испытаний на износостойкость образцов после электроискрового легирования с последующей пластической деформацией при параметрах: среда – СОЖ, нагрузка $P = 200, 400, 600, 800, 1000$ Н, по 15 мин. каждой нагрузки, обработанные раскаткой.

Разница по износу образцов и контртел на графиках 4.10 и 4.12 весьма незначительна. Средний износ не обработанных раскаткой образцов $\Delta U^{обp} = 3$ мг, а раскатанных $\Delta U^{обp} = 4,1$ мг. При этом средний износ контртела при испытании не раскатанных образцов составил $\Delta U^{kt} = 75$ мг, а раскатанных $\Delta U^{kt} = 71$ мг, разница составила всего лишь 6%.

Отсюда можно сделать вывод, что при данных условиях испытаний по «жестким» режимам раскатка практически не оказала заметного влияния на износостойкость покрытий.

Совсем иная картина складывается при испытании образцов на износ без смазки, с покрытием и без. (Рис 4.13.)

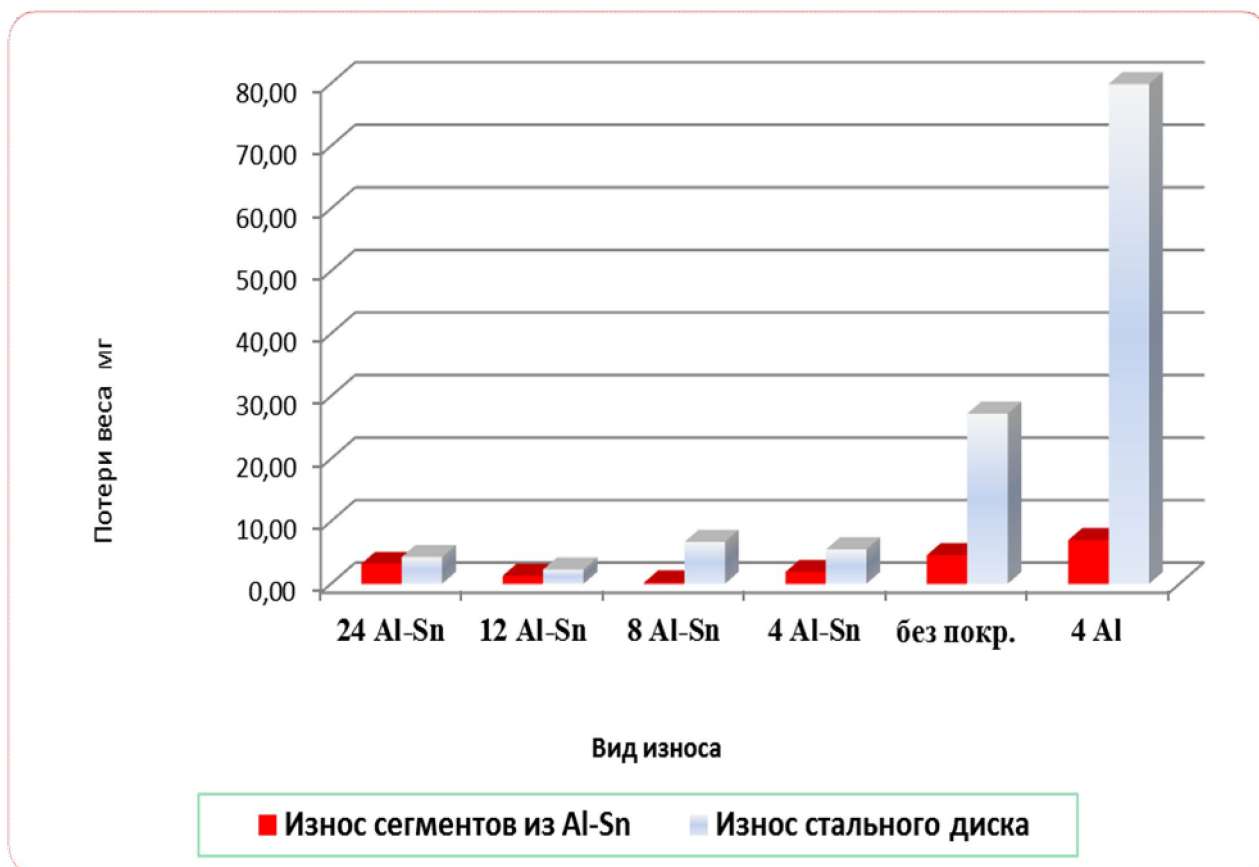


Рис. 4.13. Результаты испытаний на износостойкость образцов после электроискрового легирования при параметрах: среда – без смазки, нагрузка $P = 100 \text{ Н}$ в течение 5 мин.

Образцы без покрытия имеют меньшую износостойкость, чем образцы с покрытием. Износ образца без покрытия составил $\Delta U^{\text{обр}} = 4,6 \text{ мг}$, при износе контртела $27,2 \text{ мг}$ (коэффициент износа $5,9$). Это в два раза превышает износ образцов с покрытием из сплава АО 20-1, который составляет $\Delta U^{\text{обр}} = 2,6 \text{ мг}$. Самый низкий износ оказался у образца с покрытием из 8слоев сплава АО 20-1– всего $0,2 \text{ гр.}$ при коэффициенте износа $U = 34$.

Следует отметить, что самый большой износ $\Delta U^{\text{обр}} = 7,0 \text{ мг}$ показало покрытие из чистого алюминия при сравнительно большом износе контртела $\Delta U^{\text{обр}} = 80 \text{ мг}$ с коэффициентом износа $U = 11,4$

При увеличении времени испытания до 10 мин. (при сохранении остальных параметров неизменными) получены следующие результаты (рис. 4.14.)

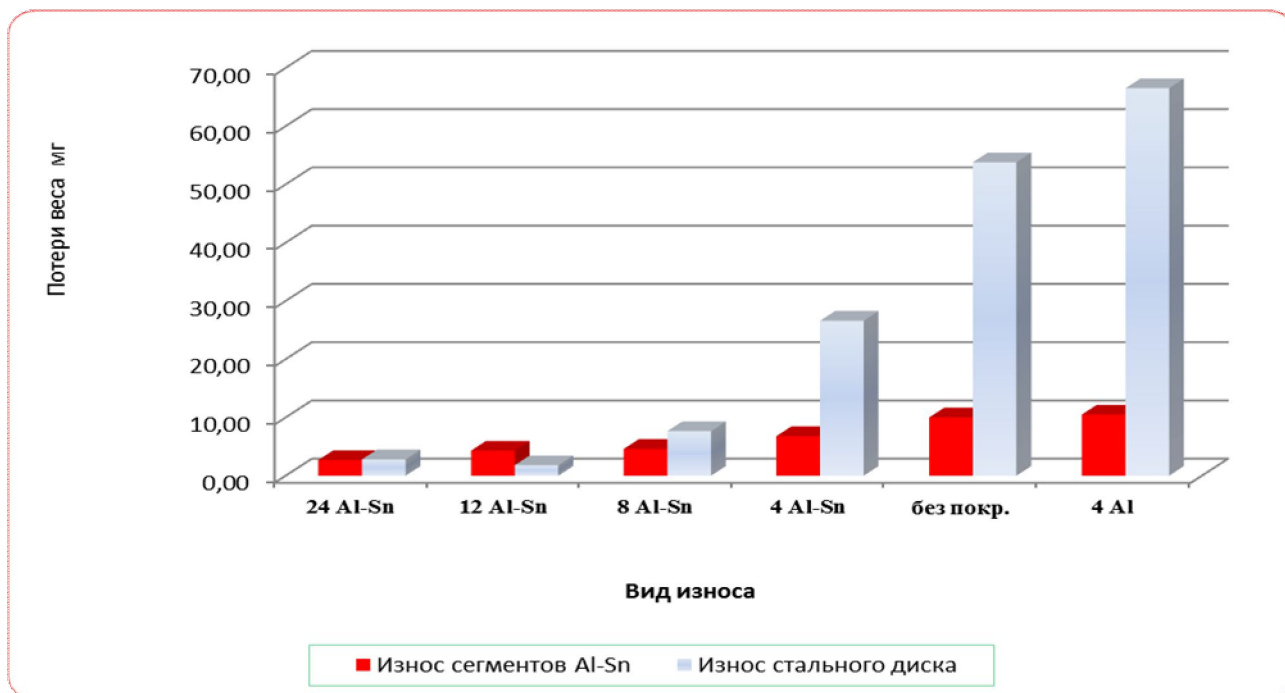


Рис. 4.14. Результаты испытаний на износостойкость образцов после электроискрового легирования при параметрах: среда – без смазки, нагрузка $P = 100 \text{ Н}$ в течение 10 мин.

Износ образцов без покрытия и с покрытием чистым алюминием одинаков, в то время как износ контртела больше у образцов с покрытием чистым алюминием. Большой износ связан с шероховатостью образцов, полученной при обработке методом электроискрового легирования.

Однако все образцы с покрытием из сплава Al-Sn показывают более высокую износостойкость, чем образцы без покрытия и с покрытием из чистого алюминия: в среднем в 2,3 раза, а в 24 слоях покрытия в 4 раза. Судя по графику (рис 4.14.), видна тенденция: с увеличением количества нанесенных слоев износ образцов с покрытием постоянно снижается с 6,8 мг до 2,7 мг, т.е. в два с половиной раза. Такой результат говорит о том, что покрытие из сплава Al-Sn работает и при отсутствии смазки.

Следует отметить, что коэффициент износа тоже снижается с $U=3,9$ (4 слоя покрытия) до $U=1$ (24 слоя покрытия). В последнем случае износ покрытия и износ контртела одинаков и составляет 2,7 мг. Это можно объяснить только тем, что покрытие при испытании было стерто и начался износ основы - сплава Д1.

Исследованиями установлено, что при трении без смазки происходит изменение структуры покрытия с образованием оксидов элементов покрытия, что подтверждается следующими данными.

При проведении замеров микротвердости покрытий до и после испытаний на трение получено: исходная микротвердость сплава Д1 составляла $\text{HV } 62 \pm 6 \text{ кг/мм}^2$, после

испытаний в смазочно-охлаждающей жидкости микротвердость покрытия изменилась незначительно $HV\ 74 \pm 22\ \text{кг/мм}^2$. Отсюда можно сделать заключение, что каких либо существенных изменений в структуре покрытия в процессе испытаний в смазочно-охлаждающей жидкости не произошло.

При испытаниях в условиях сухого трения на машине СМЦ-2 среднее значение микротвердости образцов без покрытия после испытания на трение оказалось равным $HV\ 304 \pm 50\ \text{кг/мм}^2$. Результаты измерений микротвердости показали, что в условиях сухого трения происходит существенное изменение механических свойств поверхности вследствие изменения структуры за счет окисления элементов покрытия (Al, Sn). Сравнивая результаты испытаний при относительно «мягких» режимах (при возвратно-поступательном движении контртела), когда наблюдается значительно больший износ контртела из закаленной стали, чем покрытия, и результат испытаний при более «жестких» режимах (при вращательном движении контртела), когда эффекты износа контртела и покрытия из Al-Sn становятся близкими, можно утверждать, что эффект аномального трения будет наблюдаться только при определенных условиях износных испытаний, т.е. таких, при которых не происходит изменение свойств поверхности в процессе испытаний.

Как следует из результатов испытаний, в относительно «мягких» условиях трения определяющую роль будут играть микро – и нанонити из SnO_2 , образующиеся в результате электроискрового легирования обрабатываемым электродом из сплава Al-Sn на алюминиевой поверхности. В условиях «жестких» испытаний роль микро – и нанонитей из SnO_2 нивелируется и определяющую роль в износостойкости играет обработанная электроискровым легированием матрица.

4.2 Получение и исследование свойств покрытий, полученных методом электроискрового легирования с помощью электродов из сплава Al-Pb.

При исследовании свойств покрытий, полученных путём электроискрового 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 предыдущей части работы, показали, что эффект аномального износа обусловлен появлением в поверхностных слоях алюминиевого сплава микро – и нанонитей двуокиси олова SnO_2 , имеющих высокую твёрдость $HV\ 1200\ \text{кг/мм}^2$.

Ранее было высказано предположение, что покрытия на алюминиевых сплавах, подобные тем, что получены при обработке поверхности электродами из сплава Al-Sn, должны получаться и при использовании других электродов, если они удовлетворяют следующим требованиям:

- сплавы для электродов должны представлять собой механические смеси, (а не твёрдые растворы или химические соединения);

- электрод должен представлять собой металлическую матрицу преимущественно из одного элемента, в которой равномерно распределён, в виде дисперсных частиц или сетки, другой элемент. При этом температура плавления элемента матрицы должна превышать температуру плавления распределённого в ней элемента;

- окислы этого элемента, должны обладать повышенной твёрдостью и прочностью.

Только тогда, когда все условия выполняются, можно ожидать получения покрытий с уникальными свойствами, в том числе с высокой износостойкостью.

Анализ двойных диаграмм состояния показал, что к таким сплавам, образующим механические смеси и пригодным для получения электродов для электроискрового легирования, относятся сплавы: Al-Sn, Al-Pb, Fe-Pb и другие.

Для проверки данного предположения был выбран сплав Al-Pb, диаграмма которого приведена на рис. 4.15 [165].

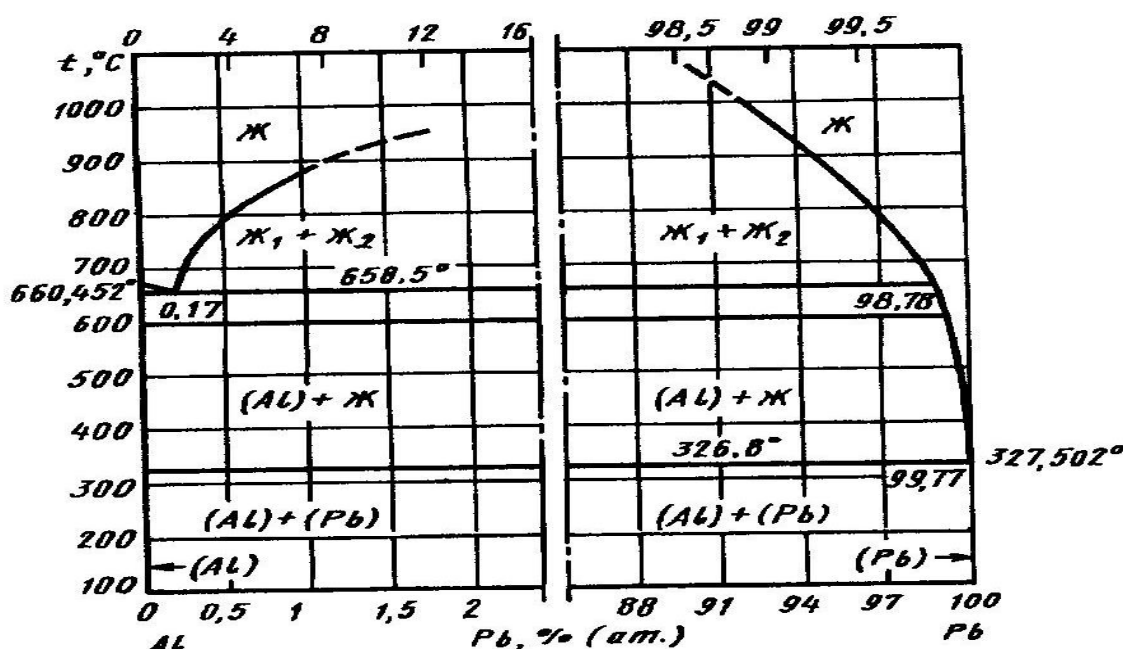


Рис.4.15 Диаграмма состояния системы Al-Pb.

Система Al-Pb характеризуется широкой областью несмешиваемости в жидком состоянии и отсутствием соединений между алюминием и свинцом, то есть свинец практически полностью нерастворим в алюминии в твёрдом состоянии. С другой стороны

температура плавления свинца 327°C , а температура плавления алюминия 660°C , что соответствует требованиям, описанным выше. Поэтому можно ожидать, что при обработке поверхности из алюминиевого сплава Д1 электродами из сплава Al-Pb в покрытии могут образоваться микро – и нанонити из окислов свинца, и поверхность приобретёт некоторые особые, возможно уникальные, свойства: износостойкость, коррозионную стойкость, высокие антифрикционные свойства и т. д.

Для проверки высказанных предположений был проведён ряд экспериментов по нанесению покрытий на образцы из сплава Д1, специально изготовленными электродами из сплава Al-Pb (по аналогии со сплавом Al-Sn). Сплав содержал 20% свинца, 1% меди, а остальное – алюминий.

Медь добавлялась в сплав для того, чтобы уменьшить ликвацию свинца, так как в сплаве большая разница между удельными весами компонентов: 2,7 и 11 г/см³. Медь кристаллизуется первой и образует разветвлённую дендритную систему кристаллов, что в значительной степени препятствует развитию ликвации. В то же время из-за малого содержания она практически не влияет на свойства сплава.

Для проведения электроискрового легирования электроды из сплава Al-Pb выплавлялись в индукционной печи ВЧИ10У по той же методике, что и для сплава Al-Sn. Покрытия наносились на механизированной установке по тем же самым режимам, что и при работе с алюминиево-оловянными электродами.

Результаты эксперимента приведены в таблице 4.6.

Испытания покрытий, полученных с помощью электроискрового легирования электродами из сплава Al-Pb, на износ были проведены по методике, описанной в главе 3. Результаты испытаний приведены на графике (рисунок 4.16.).

Для сравнения на графике приведены данные по зависимости коэффициента износа U от шероховатости покрытия. Исходя из положения кривых на графике рис 3.31, можно сделать следующие выводы:

- главный вывод заключается в том, что при нанесении покрытия электродами из сплава Al-Pb (также, как и при нанесении покрытия сплавом Al-Sn) проявляется эффект аномального трения, то есть при некоторых режимах электроискрового легирования износ полученного покрытия в несколько раз меньше износа контртела из закалённой стали;

- коэффициент износа имеет максимум при шероховатости полученного покрытия ($R_a=13,5\text{мкм}$), что говорит о том, что максимальную износостойкость можно получить лишь при определённых режимах работы установки электроискрового легирования;

Таблица 4.6.

Результаты экспериментов по нанесению покрытия электродами из сплава Al-Pb

№ п/п	Вес образцов, г		Измене ние веса слоя, мг.	Количество слоёв	Суммарное изменение веса, мг.	Режимы работы установки
	До нанесения покрытия	После нанесения покрытия				
1	2	3	4	5	6	7
1	5,984	5,915	-69	2слоя	+13	P5, A05, V=0,3мм/с.
	5.915	5,997	+82	2слоя		
2	6,090	6,020	-70	2слоя	-70	
	6,020	6,020	00	2слоя		
3	6,530	6,582	+48	5слоёв	+33	P5, A05, V=1,5мм/с.
	6,582	6,567	-15	5слоёв		
	6,327	6,309	-18	5слоёв	-21	
	6,309	6,306	-3	5слоёв		
4	9,104	9,125	+21	2слоя	+23	P5,A05, V=0,3 мм/с.
	9,125	9,127	+2	2слоя		
5	7,671	7,664	-7	2слоя	-2	
	7,664	7,669	+5	2 слоя		
6	7,805	7,805	0	10слоёв	-1	P5,A05, V=1,5 мм/с.
	7,805	7,804	-1	10 слоёв		
7	8,315	8,306	-9	10слоёв	-37	
	8,306	8,289	-17	10 слоёв		

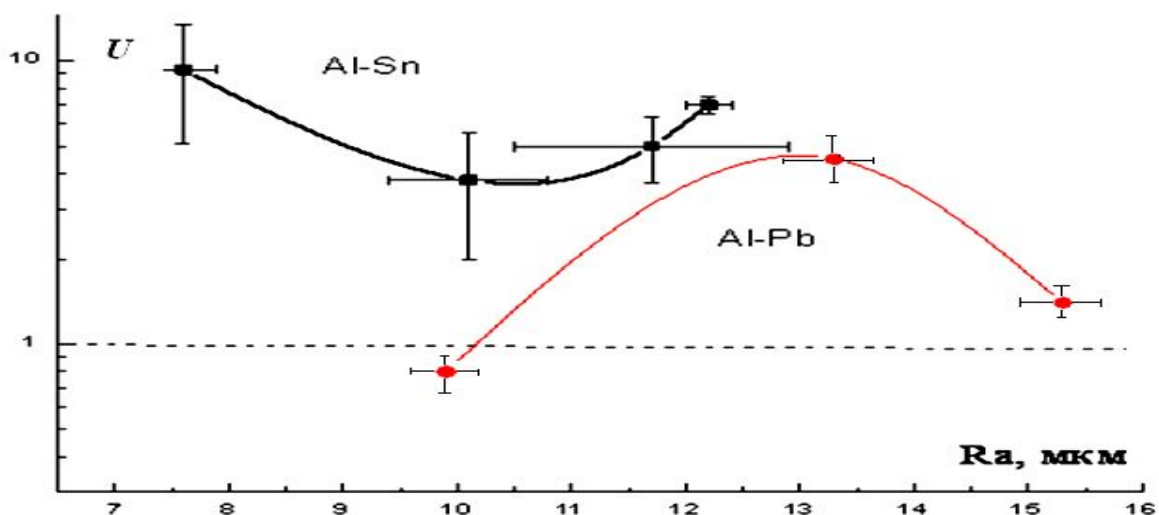


Рис. 4.16. Зависимость коэффициента износа покрытия от шероховатости поверхности в условиях сухого трения.

-эффект от покрытия алюминиево - свинцовым сплавом, по сравнению с покрытием из алюминиево - оловянного сплава, имеет более низкие значения и при более высокой шероховатости, из чего можно предположить, что образующиеся нановолокна окисла PbO_2 имеют меньшую твёрдость, чем окислы SnO_2 ;

- покрытия, полученные методом электроискрового легирования электродами из сплава алюминий - свинец, показывают эффект аномального трения, что говорит о возможности получения покрытий с эффектом аномального трения и с помощью других подобных элементов.

4.3. Изменение состава обрабатываемых электродов из сплава Al-Sn при электроискровом легировании алюминиевых сплавов.

Электроискровое легирование металлических поверхностей основано на явлении полярного переноса материалов анода и катода. При электроискровом легировании в газовой среде наблюдается преимущественный перенос с анода (обрабатываемого электрода) на катод (электрод-деталь) [112,113,114]. Согласно модели электроискрового легирования Верхотурова А.Д. взаимный перенос материалов катода и анода происходит в момент контакта электродов, в результате чего на катоде образуется легированный слой покрытия, а на аноде – вторичная структура [117].

Взаимный перенос материалов анода и катода обусловлен не только составом и свойствами материалов анода и катода, но и, в значительной степени, параметрами процесса электроискрового легирования (энергией импульсного разряда, частотой следования импульсов, амплитудой вибрации и т.д.).

При длительной эксплуатации электродов в результате образования на их поверхности вторичных структур, свойства электродов значительно меняются, что сказывается на эффективности процесса электроискрового легирования.

При электроискровом легировании использование обрабатываемых электродов из сплава Al-Sn позволяет получить на алюминиевых сплавах покрытие с включениями микро- и нановолокнистых структур, состоящих из оксида олова. Эти покрытия обладают специфическими свойствами, а именно: при невысокой твердости основы имеют высокую износостойкость, превышающую износостойкость закаленной стали в $5 \div 6$ раз.

Для изучения кинетики переноса материалов с анода на катод и природы изменения свойств электродов в процессе электроискрового легирования был проведен ряд экспериментов с определением элементного состава анода с помощью приставки EDX (таб.4.7). Исследовались образцы обрабатываемых электродов, не участвовавших в процессе электроискрового легирования, а так же обрабатываемых электродов, проработавших разное количество времени с разными режимами нанесения покрытий на образцы из сплава Д1.

Усредненный химический состав обрабатываемых электродов в зависимости от режимов электроискрового легирования и времени наработки приведен в таблице 4.7.

Таблица 4.7.

Химический состав электродов до после их использования в зависимости от режимов электроискрового легирования.

N п.	Состав (% массовые)					Примечание
	Al	Sn	Fe	O	Zn	
1	67,8	19,6	1,10	11,5	0,2	Исходный образец электрода (верх)
2	68,4	23,0	1,00	7,3	0,25	Исходный образец электрода (низ)
3	56,3	13,6	0,40	29,2	0,0	6 режим; коэфф. энергии.0,8; амплитуда 0,5; скорость 0,5 мм/сек; 4 слоя
4	39,6	12,0	0,50	45,1	2,8	7 режим; коэфф. энергии.0,8; амплитуда 0,5; скорость 0,5 мм/сек; 4 слоя
5	32,0	38,2	0,25	28,6	0,8	5 режим; коэфф. энергии.0,8; амплитуда 0,5; скорость 0,5 мм/сек 20 слоёв.

Результаты элементного и фазового анализов показали следующее:

1. В исходных образцах обрабатываемых электродов содержание Al и Sn находятся в пределах, допускаемых ГОСТом, т.е. Al~68% , Sn ~20%.

2. Рентгенофазовый анализ показал, что в материале электрода с вероятностью $\eta > 0,8$ содержатся в чистом виде Al: $\eta = 0,85$, Sn: $\eta = 0,83$, Fe: $\eta = 0,86$ и небольшие примеси

Cu с вероятностью $0,8 > \eta > 0,7$. Окислы Al, Sn, Cu не обнаружены, хотя согласно элементному анализу они в этом образце присутствуют (количество кислорода в материале электрода в среднем 9 %). Это говорит о том, что в материале электрода оксиды могут находиться в аморфном, некристаллическом состоянии, тогда эти оксиды рентгенофазовым анализом не определяются.

3. Во время процесса электроискрового легирования происходит интенсивное окисление элементов, входящих в материал электрода (Al, Sn). Если в исходном образце количество кислорода составляло $7 \div 11\%$, то после непродолжительного времени работы оно возросло до $29 \div 45\%$ т.е. почти в 4 раза. При этом следует отметить некоторые особенности изменения количества кислорода в электроде: с увеличением энергии искрового разряда, при переходе с 6 режима работы на 7, количество кислорода, а соответственно, и количество оксидов возросло в 1,5 раза, а по сравнению с исходным содержанием - в 5 раз. Логично предположить, что образовавшиеся на поверхности электрода оксиды из сплава Al-Sn, (наряду с теми, которые образуются в межэлектродном промежутке), в таком мелкодисперсном виде переносятся на катод, образуя износостойкое покрытие.

При низкой энергии импульсного разряда (5 режим, образец 5, таб.3.10) окисление элементов электрода тоже происходит, но с меньшей интенсивностью. При большой длительности процесса электроискрового легирования содержание кислорода достигает такой же величины (29%), как и при высокой интенсивности энергии импульсного разряда, но при гораздо меньшей длительности процесса. Таким образом, процесс образования окислов на электроде можно регулировать либо увеличением интенсивности режима обработки, либо его длительностью при снижении интенсивности.

4. При проведении процесса электроискрового легирования с электрода уносится как Al, так и Sn, но в разной степени, причём унос зависит от режимов обработки. При невысокой энергии импульсного разряда (5 режим, образец 5, таб.3.10) олово практически не уносится (на электроде остается 38%), но зато больше уносится алюминия (было 68%, стало 32%). В результате такой обработки содержание Al и Sn в электроде выравнивается: 32% и 38% соответственно. При повышении интенсивности искровых разрядов (режим 6, образец 3, таб.3.10) соотношение уноса Al и Sn меняется - больше уносится Sn (соответственно 38% Sn и 18% Al). Это можно объяснить тем, что при более интенсивных режимах обработки в большей степени окисляется Sn. Окислы олова являются более хрупким материалом, чем чистое олово, и поэтому унос его с электрода значительно больше.

5. В процессе электроискрового легирования происходит взаимное обогащение элементами обрабатывающего электрода и электрода-образца, т.е. часть элементов переносится не только с обрабатывающего электрода на образец, образуя покрытие, но и с образца на обрабатывающий электрод, образуя вторичные структуры. Характерным индикатором такого процесса является Zn. В исходном образце обрабатывающего электрода цинка содержится всего 0,2 % . При интенсивном режиме работы (образец 4 табл.3.10) его содержание возрастает на порядок - 2,8 % , что связано с избирательным переносом его с образца из сплава Д1 (содержание Zn – 1%) на электрод.

В результате изучения изменения состава электродов в процессе электроискрового легирования алюминиевых сплавов можно сделать следующие выводы:

1. В процессе электроискрового легирования элементы, входящие в состав обрабатывающего электрода частично окисляются еще до выхода в межэлектродное пространство и в таком виде переносятся на образец.

2. Оксиды на поверхности обрабатывающего электрода и покрытия могут находиться в аморфном состоянии и рентгенофазовым анализом не определяются.

3. В процессе электроискрового легирования происходит процесс взаимодействия обрабатывающего электрода и образца, в результате чего материал обрабатывающего электрода (анода) обогащается материалом катода.

4. Для повышения эффективности нанесения покрытия необходимо периодически зачищать рабочую поверхность обрабатывающего электрода с целью удаления поверхностного слоя, обогащенного элементами образца (катода).

4.4. Заключение и выводы

В результате проведения экспериментов по нанесению покрытий с помощью электроискрового легирования на сплав Д1 обрабатывающими электродами из Al-Sn установлено:

1. При испытании на износостойкость при трении в масле износ контртела из закаленной стали превышает износ образца из сплава Д1 с покрытием ~ в 6÷7 раз и на порядок превышает износостойкость сплава Д1 без покрытия. Поэлементный анализ с помощью приставки EDX к электронному микроскопу показал наличие кислорода в покрытии. Рентгенофазовый анализ не показал наличия оксидов металлов в покрытии, что дает основание предположить присутствие оксидов в аморфном состоянии. Установлено, что износостойкость покрытия обеспечивается оксидами олова SnO_2 , твердость которых достигает HV 1200 кг/мм².

2. При минимальной скорости обработки достигается максимальное приращение слоя покрытия и максимальная шероховатость поверхности, но при этом не достигается максимальная износостойкость. Наиболее высокая износостойкость получается при высокой скорости обработки, когда происходит «обыскривание» поверхности, при котором привеса не наблюдается, но свойства поверхности изменяются в результате её модифицирования.

3. Эффект превышения износа контртела по сравнению с износом покрытия, полученного путем электроискрового легирования и обусловленного наличием микро- и нанонитей из SnO₂, наблюдается как при трении в масле, так и при трении без смазки, при различных режимах обработки. Однако в условиях трения без смазки он достигает максимальной величины при обработке поверхности в режиме «обыскривания» и постоянстве энерговода в искровой промежуток (при высоких скоростях перемещения обрабатываемого электрода и большей длительности электроискрового воздействия).

4. Испытания по схеме «ролик-колодка» в условиях трения в смазочно-охлаждающей жидкости показали, что образцы с покрытием из сплава Al-Sn в ~10 раз выше износостойкости контртела из закаленной стали, а при трении в отсутствие смазки - всего в ~3 раза. Установлено, что микротвердость покрытия после износных испытаний в смазочно-охлаждающей жидкости практически не изменилась, а после испытаний в условиях трения без смазки микротвердость увеличилась в два раза по сравнению с исходной. Это означает, что произошло изменение структуры покрытия в результате образования оксидов элементов, содержащихся в покрытии.

5. Установлено, что в результате испытаний в относительно «мягких» условиях трения (невысокая нагрузка при относительно низкой скорости скольжения) определяющую роль в повышении износостойкости покрытия играют микро- и нанонити из оксидов олова, а в условиях «жестких» испытаний (высокие нагрузки и скорости) роль микро- и нанонитей нивелируется, и определяющую роль играет обработанная методом электроискрового легирования матрица.

6. Испытания на износостойкость показали, что износ покрытия из сплава Al-Pb в несколько раз меньше износа контртела из закаленной стали, что подтверждает возможность получения износостойких покрытий с помощью электродов, имеющих структуру механической смеси, состоящей из тугоплавкой матрицы и равномерно распределенного в ней, в виде сетки, легкоплавкого компонента.

7. Исследование кинетики переноса материалов в процессе электроискрового легирования показало, что происходит взаимное обогащение элементами обрабатываемого электрода и электрода-образца, в результате чего на электродах образуются вторичные

структуры. Часть элементов, входящих в состав обрабатывающего электрода, окисляются еще до выхода в межэлектродное пространство, и в таком виде переносятся на образец. Процесс образования окислов на электроде можно регулировать либо увеличением интенсивности режима обработки, либо его длительностью при сниженной интенсивности.

8. При длительной эксплуатации электродов, в результате образования на их поверхности вторичных структур, свойства электродов значительно меняются, что сказывается на эффективности процесса электроискрового легирования.

9. Результаты настоящего исследования основаны на использовании обрабатывающего электрода из сплава Al-Sn с 20% Sn (АО20-1). Необходимы дальнейшие исследования для определения соотношения Al и Sn в обрабатывающем электроде.

5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ.

Одной из приоритетных задач развития системы технического сервиса машин является развитие технологий восстановления изношенных деталей, так как их стоимость, как правило, в полтора - два раза ниже себестоимости новых при одинаковом ресурсе.

При выборе технологического способа восстановления большое значение имеет величина максимального износа, при которой деталь становится непригодной к эксплуатации. В общем случае 85% деталей машин становятся непригодными при износах, не превышающих $(0,2 \div 0,3) \cdot 10^{-3}$ м. [173], причем подавляющее большинство восстанавливаемых деталей (около 80%) - имеет максимальный износ до $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Такой же статистике подвержены алюминиевые подшипниковые щиты электродвигателей, алюминиевые крышки электрогенераторов, посадочные места подшипников в корпусах насосов из алюминиевых сплавов и других устройств различного типа.

По статистике среди всех восстанавливаемых поверхностей автотракторных деталей около 40% составляют изношенные отверстия [172].

Так как химический состав алюминиевых деталей, условия работы, диаметры отверстий, в том числе посадочных мест под подшипники, у разных деталей различны, то различны и технологические способы их восстановления.

Широко используемые способы восстановления алюминиевых деталей машин, из которых 70% составляют различные виды сварки и наплавки [172], не всегда эффективны по следующим причинам:

- не обеспечивают упрочнения изношенных поверхностей;
- ведут к короблению деталей из-за подвода большого количества тепла, что требует последующей дополнительной механической обработки.

Поэтому внедрение новых, прогрессивных способов ремонта алюминиевых деталей является весьма актуальным.

Перспективным способом восстановления изношенных поверхностей деталей из алюминиевых сплавов (как показано в гл.2) является получение покрытия заданной толщины путем электроискрового легирования. Такие покрытия обладают высокой износостойкостью, имеют простое аппаратное обеспечение и легко наносятся на изношенные детали в условиях ремонтных мастерских, и даже в полевых условиях.

Для практического внедрения разработанных технологий выбрано два направления работ:

- ремонт посадочных мест под подшипники в деталях из алюминиевых сплавов, в том числе на примере подшипниковых щитов электродвигателей, крышек автотракторных генераторов и водяных насосов;

- ремонт трубчатых сердцевин алюминиевых радиаторов автомобильных и тракторных двигателей.

5.1 Ремонт посадочных мест под подшипники в корпусных деталях из алюминиевых сплавов

Крышки автотракторных электрогенераторов и подшипниковые щиты электродвигателей являются важными деталями, т. к. отказы этих узлов ведут к простоям техники, росту затрат на ремонт и т.д. Поэтому повышение долговечности подшипниковых узлов путём восстановления посадочных мест подшипников является актуальной задачей.

Ресурс большинства подшипников качения, применяемых в подшипниковых узлах электродвигателей и электрогенераторов, составляет в среднем 3000 часов и во многом зависит от посадок подшипников в корпусных деталях. Увеличение зазора между наружным кольцом подшипника и посадочным местом в узле ухудшает распределение нагрузки между телами качения, что приводит к снижению долговечности подшипника. Такое увеличение зазора возникает, в основном, за счёт изнашивания посадочного места в результате фреттинг-коррозии. При поступлении электродвигателей и электрогенераторов в ремонт дефекты распределяются следующим образом: 50%- механические повреждения, остальные 50%-дефекты электрической части. При этом 30% всех поступающих в ремонт электродвигателей и электрогенераторов имеют повышенный износ посадочных мест. Причинами указанных дефектов являются:

- выход из строя подшипников или их некачественная работа;
- повышенная вибрация ввиду дисбаланса ротора или приводимых механизмов;
- некачественная центровка двигателя с приводимым агрегатом;
- естественный износ металла подшипников;
- недостаточное упрочнение посадочного места;
- перегрузка механической части, возникающие ударные нагрузки со стороны привода;
- многократная распрессовка и напрессовка подшипников, что приводит к нарушению равномерности зазора между ротором и статором, возникновению повышенной вибрации с соответствующими негативными последствиями.

Неисправность посадочных мест под подшипники обычно определяется путём диагностирования работающего электродвигателя на специальном стенде.

Посадочные места под подшипники в корпусах и деталях из алюминиевых сплавов восстанавливаются следующими способами:

- установкой дополнительных деталей - втулок;
- аргоно - дуговой наплавкой;
- нанесением электролитических покрытий;
- нанесением полимерных покрытий на основе анаэробных герметиков.

Перечисленные способы имеют общие недостатки: сложность технологического процесса, потребность в дорогостоящем оборудовании, вследствие чего повышается трудоёмкость и себестоимость, увеличивается расход материалов, необходимых для восстановления посадочных мест. Большинство вышеприведённых способов не могут обеспечить требуемый ресурс отремонтированных электродвигателей, электрогенераторов и насосов.

Материал, наносимый на посадочное место, должен иметь высокий модуль упругости и предел прочности в рабочем интервале температур. Эксперименты показали, что таким материалом, отвечающим указанным выше требованиям, является покрытие, полученное с помощью электроискрового легирования электродами из сплава Al-Sn. Ввиду высокой износостойкости покрытие хорошо противодействует фреттинг - коррозии. С другой стороны, износ посадочных мест под подшипники, как правило, не превышает $(0,1 \div 0,3) \cdot 10^{-3}$ м, что позволяет восстанавливать их методом электроискрового легирования, применяя несложное мобильное оборудование и относительно простую технологию. При этом процесс восстановления посадочных мест экологически чистый, так как не применяются вредные вещества и отсутствуют экологически грязные отходы.

Замеры изношенных посадочных мест деталей показали (таб. 5.1.), что большая их часть имеет износ в пределах $(0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-3}$ м. Поэтому необходима разработка технологии для получения покрытия толщиной $(0,2 \div 0,3) \cdot 10^{-3}$ м на сторону, чтобы обеспечить последующую механическую обработку. Для стандартно применяемой технологии электроискрового легирования получение покрытий такой толщины на алюминиевых сплавах затруднительно.

В результате проведения исследования было установлено, что для получения покрытия повышенной толщины необходимо использование технологии «барьерных» слоев [177]. Сущность технологии заключается в следующем: после нанесения 3÷4 слоев сплава Al-Sn, когда приращение слоя приостанавливается, наносится так называемый «барьерный»

слой, который изолирует нанесённое покрытие из сплава Al-Sn от следующего слоя такого же состава и позволяет продолжать наращивать толщину покрытия. «Барьерный» слой наносится из сплава алюминия и какого-либо другого металла, образующего с алюминием твердые сплавы (медь, цинк, никель и т.д.). После этого на поверхность алюминиевых деталей можно наносить ещё несколько слоев покрытий электродом из сплава Al-Sn. Исследования показали (рис. 5.1), что наиболее эффективным «барьерным» слоем является слой полученный с помощью обрабатывающего электрода из сплава Al-Ni (10% Ni , остальное Al). Малопригодным для получения «барьерного» слоя является сплав Al+10% Zn , а сплавы Al-Cu, Al-Si заняли промежуточное положение.

Используя технологию «барьерных» слоев были восстановлены посадочные места крышек генераторов, подшипниковых щитов электродвигателей насосов и корпуса водяной помпы автомобиля «Газель» (табл.5.1 и рис. 5.2)

Таблица 5.1.

Восстановление посадочных мест под подшипники

	Наименование	Диаметр отверстия исходный мм	Допустимый размер мм (посадка K6/l6)	Диаметр отверстий	
				после нанесения покрытия	после механической обработки
1	Крышка генератора автомобиля	$35^{+0,15}_{+0,12}$	$35^{+0,018}_{-0,008}$	$35^{-0,18}_{-0,17}$	$35^{+0,012}$
2	Крышка генератора автомобиля	$35^{+0,20}_{+0,08}$	$35^{+0,018}_{-0,008}$	$35^{-0,19}_{-0,16}$	$35^{+0,01}$
3	Крышка генератора автомобиля	$35^{+0,18}_{+0,15}$	$35^{+0,018}_{-0,008}$	$35^{-0,22}_{-0,16}$	$35^{+0,01}$
4	Крышка водяного насоса	$35^{+0,14}_{+0,06}$	$35^{+0,018}_{-0,008}$	$35^{-0,20}_{-0,14}$	$35^{+0,01}$
5	Крышка водяного насоса	$35^{+0,38}_{+0,12}$	$35^{+0,018}_{-0,008}$	$35^{-0,18}_{-0,16}$	$35^{+0,014}$
6	Крышка водяной помпы	$35^{+0,15}_{+0,12}$	$35^{+0,018}_{-0,008}$	$35^{-0,24}_{-0,20}$	$35^{+0,006}$
7	Крышка автогенератора	$47^{+0,25}_{+0,12}$	$47^{+0,018}_{-0,008}$	$47^{-0,21}_{-0,18}$	$47^{+0,012}$
8	Крышка насоса	$47^{+0,31}_{+0,18}$	$47^{+0,018}_{-0,008}$	$47^{-0,25}_{-0,19}$	$47^{+0,009}$

В связи с высокой шероховатостью покрытий для обеспечения размера и чистоты посадочного места, покрытие наносилось с учетом последующей механической обработки.

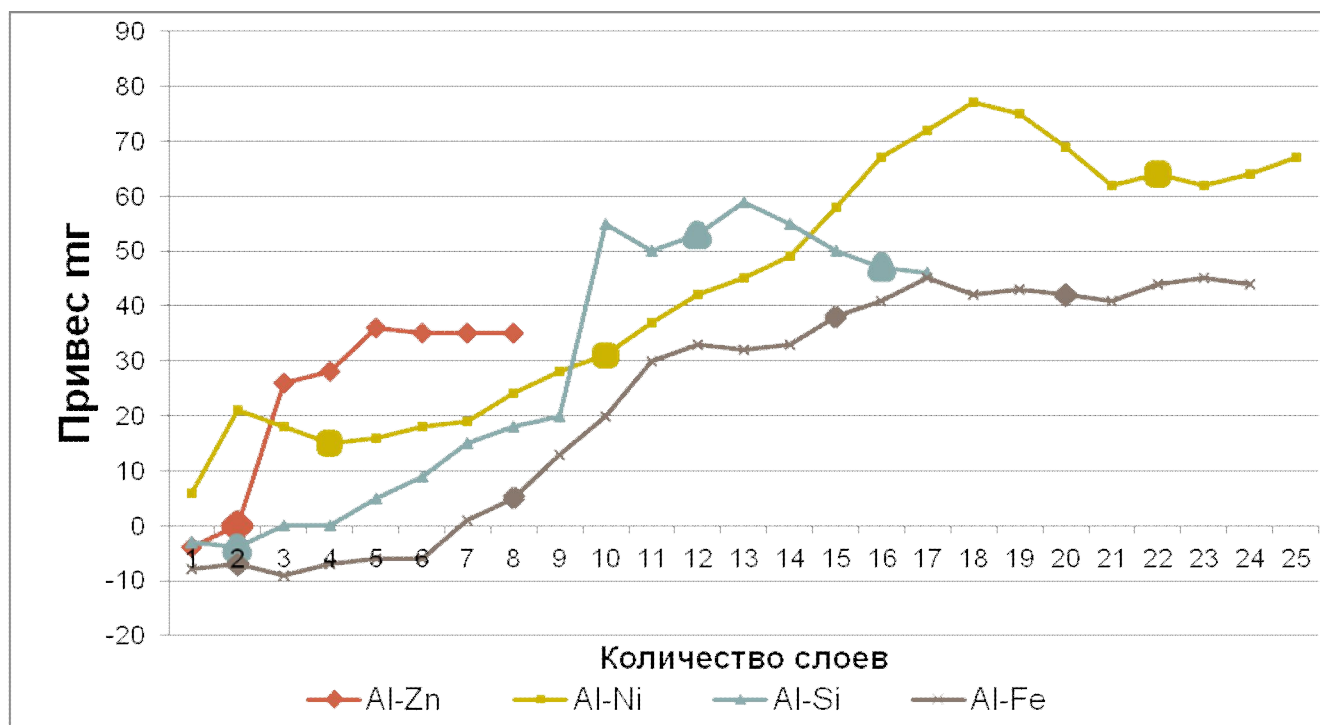


Рис. 5.1 Зависимость привеса образцов от нанесения «барьерных» слоев электродами Al-Zn, Al-Ni, Al-Si, Al-Fe.

Последующая механическая обработка путем расточки на токарном станке обеспечивала получение необходимого посадочного размера и чистоты поверхности (таб.5.1.).

Таким образом, технология восстановления посадочных мест под подшипники в алюминиевых деталях с помощью электроискрового легирования заключается в следующем:

- очистка посадочных мест от загрязнений;
- замер диаметра отверстия с помощью индикаторного нутромера и определение необходимой толщины покрытия;
- нанесение покрытия методом электроискрового легирования с помощью технологии «барьерных» слоев;
- механическая обработка отверстия (расточка или раскатка)



Рис 5.2 Детали, восстановленные с помощью электроискрового легирования.

На технологию восстановления посадочных мест под подшипники в алюминиевых деталях получен патент ПМР на изобретение №458(см. Приложение 6) . Технология принята к внедрению на предприятиях ДООО «Молдавизолит-РиО» и ООО «Торговый проект» (Акты внедрения см. Приложение 4÷5).

5.2. Ремонт алюминиевых радиаторов автотракторных двигателей.

Для достижения высоких показателей теплопроводности, а также малых размеров и массы теплообменников, в их конструкции используются трубки из легких и высокотеплопроводных металлов и сплавов на основе алюминия и меди, причем все большее распространение получают радиаторы из алюминиевых сплавов.

Тонкостенные трубки в процессе эксплуатации подвергаются существенным термическим (из-за расширения и сжатия металла при нагреве и охлаждении) и

механическим (вибрационным) нагрузкам. Кроме того, на их прочность и надежность оказывают влияние коррозионные процессы, неизбежно возникающие в любой системе, по которой циркулирует горячая жидкость.

Важность своевременного обслуживания и своевременного ремонта радиатора объясняется тем, что нарушение герметичности системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) приводит к выходу его из строя вследствие перегрева.

Наиболее типичные дефекты радиаторов и теплообменников связаны с потерей герметичности трубок, что приводит к утечкам рабочего тела.

Примерами повреждения теплообменников могут быть:

- трещины, пробоины или коррозия трубок;
- повреждение или разрушение уплотнителей;
- разгерметизация соединений в местах стыков трубок с бачками.

Существуют следующие методы ремонта радиаторов:

- введение в охлаждающую жидкость специальных составов, герметизирующих трещину;
- глушение дефектных трубок разными способами;
- герметизация трубок при помощи составов на основе эпоксидных смол и анаэробных герметиков;
- пайка дефектных трубок легкоплавкими и тугоплавкими припоями.

Устранение повреждений и восстановление герметичности алюминиевых трубок имеют следующие проблемы:

- плохая свариваемость и паяемость, так как на поверхности трубок присутствует тугоплавкая пленка Al_2O_3 , препятствующая надежному соединению свариваемых или спаиваемых металлов;
- высокую теплопроводность сплавов алюминия, что препятствует сварке и пайке, так как требует подвода большого количества тепла ;
- высокий коэффициент линейного расширения, что ведет к короблению деталей
- малая толщина стенок трубок ($\sim 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), что часто приводит к прогарам.
- низкая температура плавления.

Стандартная технология ремонта радиатора путем пайки содержит следующие операции:

- очистка и визуальный осмотр повреждений;
- дефектация с помощью испытания сжатым воздухом или водой под давлением;
- устранение дефекта с помощью пайки легкоплавким или тугоплавким припоем с применением фтористых и хлористых флюсов;

- испытание радиатора под давлением .

Самым надежным способом восстановления работоспособности радиаторов является пайка легкоплавкими и тугоплавкими припоями. Если при пайке латунных радиаторов особых проблем не возникает (применяется аргонно-дуговая пайка или газопламенная пайка), то при пайке алюминиевых радиаторов возникают перечисленные проблемы из-за особых физических и химических свойств алюминиевых сплавов. Низкая температура плавления (660°C) и высокая теплопроводность в сочетании с тонкими стенками ($\delta=0,4\cdot 10^{-3}\text{м}$) радиаторных трубок не дают возможности применить аргонно-дуговую пайку. А наличие на поверхности трубок пленки окислов Al_2O_3 с высокой температурой плавления (2500°C) препятствует нанесению припоя, т.к. припой ПОС40 на окисленную алюминиевую поверхность не ложится. Для предварительного удаления с поверхности дефектного места трубки пленки окислов применяется сложная технология: обезжиривание, травление, декапирование в различных экологически вредных составах. При этом необходимо применять флюсы, состоящие из хлористых и фтористых солей, которые могут вызывать коррозию паяных соединений, поэтому требуется тщательная промывка и нейтрализация солевых растворов оставшихся на поверхности паяных изделий. В связи с этим эта технология является экологически вредной.

Учитывая недостатки существующих технологий, разработана новая бесфлюсовая технология пайки автотракторных радиаторов. Для этого место дефекта очищается от грязи и с помощью электроискрового легирования поверхность модифицируется электродом из сплава Al-Sn с последующим нанесением с помощью электроискрового легирования легкоплавкого припоя ПОС-40. Процесс электроискрового легирования позволяет разрушить окисную пленку на поверхности трубок и облегчить последующее лужение поверхности легкоплавким припоем ПОС-40. После лужения дефектное место паяется стандартным способом и трудностей не представляет.

Применение предварительного нанесения подслоя электродами из сплава Al-Sn и припоя ПОС-40 на дефектную поверхность с помощью электроискрового легирования позволит снизить количество подготовительных операций и повысить надежность паяных соединений при одновременном сокращении затрат на ремонт радиаторов с алюминиевыми трубками.

Для отработки технологии ремонта сердцевины алюминиевых радиаторов разработан стенд (рис. 5.3), позволяющий определить места течи радиатора путем подачи в него сжатого воздуха под давлением .



Рисунок 5.3. Стенд для испытания автотракторных радиаторов.



Рисунок 5.4. Радиатор с дефектными трубками.

При глушении всех отверстий радиатора с помощью специальных пробок к патрубку, идущему в расширительный бачок, подсоединялся шланг от компрессора. Давление сжатого воздуха регулировалось воздушным редуктором от 0,03 до 0,15 МПа. При опускании радиатора в воду, идущие вверх пузырьки воздуха указывали место нарушения

герметичности. Отработка технологии сначала велась на алюминиевых трубках дефектного радиатора. На трубках делались надрезы и сверления, имитирующие дефекты (рис.5.5)



Рисунок 5.5. Трубка для запаивания с искусственно сделанными повреждениями .

После этого на дефектных местах с помощью электроискрового легирования электродами из сплава Al-Sn наносилось покрытие, которое разрушало окисную пленку из Al_2O_3 на поверхности трубки и способствовало подготовке поверхности под пайку припоем из оловянно - свинцового сплава ПОС40 . Пайка велась обычным паяльником мощностью 40÷60 Вт без применения флюса. Процесс пайки заключался в том, что покрытие разравнивалось по поверхности трубки таким образом, чтобы вокруг отверстий получался слой припоя не менее $10 \cdot 10^{-3}$ м шириной. Слой такой ширины необходим, чтобы увеличить площадь сцепления припоя с трубкой радиатора и повысить надежность и герметичность паяного слоя.

Испытания трубок на стенде при стандартных условиях (давление 0,125МПа с выдержкой 10 мин) показали, что все трубки в количестве 5 шт. испытание выдержали успешно (рис 5.6). При переходе непосредственно к радиаторам технология была сохранена. Последующие испытания на стенде отремонтированных радиаторов показали надежность технологии – течь отсутствовала.



Рисунок 5.6. Трубка радиатора прошедшая обработку электроискровым легированием и пайку припоем ПОС40.

На разрабатываемую технологию получен патент ПМР №457 (см. Приложение 7)

Технология принята к внедрению на предприятии ООО ПКЦ «Современные технологии» (Акт см. Приложение 3).

5.3 Расчет экономической эффективности внедрения новой технологии ремонта автотракторных радиаторов.

Окончательное решение о целесообразности применения в ремонтном производстве разработанного технологического процесса может быть принято после определения его экономической эффективности в сравнении с базовым вариантом. Расчет капитальных вложений производился с учетом уже имеющихся на станции технического обслуживания площадей и некоторых единиц оборудования.

Определение годового экономического эффекта основывается на сопоставимости приведенных затрат на восстановление радиаторов по базовой и новой технологиям. Годовой экономический эффект определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = (Z_2 - Z_1) W_1,$$

где $\mathcal{E}$ - годовой экономический эффект, руб.;

Z_1 Z_2 — приведенные затраты на восстановление радиатора соответственно по новому и базовому вариантам, руб./шт.;

W_1 - возможный объем восстановления радиаторов с использованием новой технологии, шт.

Для определения цены восстановленного радиатора необходимо произвести расчет его себестоимости.

Себестоимость восстановления радиатора по новой технологии с применением электроискрового легирования определяется по формуле:

$$C_B = C_M + 3П + A + P + Э + C_{BC} + ОПУ,$$

где :

C_B — себестоимость восстановления, руб.;

C_M - стоимость основных и вспомогательных материалов, применяемых при восстановлении, руб.;

ЗП - заработная плата (основная и дополнительная) производственных рабочих с начислениями, руб.;

A - амортизационные отчисления от стоимости технологического оборудования и приспособлений, руб.;

P - затраты на техническое обслуживание, ремонт оборудования, приспособлений, руб.;

Э - затраты на электроэнергию для технологических целей, руб.;

C_{BC} - затраты на воду и сжатый воздух для технологических целей, руб.;

ОПУ — расходы, связанные с организацией производства и управлением, руб.

Стоимость основных и вспомогательных материалов определяют как сумму затрат по всем наименованиям материалов, применяемых при восстановлении радиатора:

$$C_M = \sum_{i=1}^n q_i \times C_i$$

где n — количество наименований материалов, применяемых при восстановлении:

q_i - норма расхода i-го материала, кг/дет.;

C_i - цена 1 кг i-го материала, руб./кг.

$$C_M = 0,04 \cdot 153,65 = 6,15 \text{ руб}$$

Заработную плату определяют с учетом всего комплекса операций предусмотренных технологическим процессом восстановления детали, по формуле:

$$ЗП = (T_{H1} \cdot C_{P1} / 60) \cdot K_n \cdot K_d \cdot K_c$$

где T_{H1} — норма времени на выполнение операций технологического процесса восстановления радиатора.

C_{P1} - часовая тарифная ставка соответствующего разряда на выполнение операции, руб/ч.;

K_n - коэффициент, учитывающий премиальную доплату ($K_n = 1,1 \dots 1,4$);

K_d - коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату ($K_d = 1,1 \dots 1,5$);

K_c - коэффициент, учитывающий отчисления в фонды социального страхования ($K_c = 1,385$).

$$ЗП = (180 \cdot 28,64 / 60) \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,385 = 185,64 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления от технологического оборудования и приспособлений:

$$A = \frac{B_i \times a_i}{100 \times N}$$

где B_i ; - балансовая стоимость технологического оборудования и приспособлений, руб.

Технологическое оборудование :

- стенд для испытаний радиаторов - балансовая стоимость 10035 руб.

- установка ALIER – 31 - балансовая стоимость 27875 руб.

Суммарная балансовая стоимость составляет

$$\sum B_i = 10035 + 27875 = 37\,910 \text{ руб.}$$

a_i , - годовые нормы амортизационных отчислений в процентах от балансовой стоимости оборудования и приспособлений;

N — программа ремонта, шт.

Маркетинговые исследования, показали, что годовая экономическая программа ремонта радиатора составляет 500 шт.

$$A = (37\,910 \cdot 4,4) / (100 \cdot 500) = 3,34 \text{ руб.}$$

Затраты на техническое обслуживание, ремонт оборудования, приспособлений - три процента от балансовой стоимости оборудования:

$$P = (37\,910 \cdot 3) / (100 \cdot 500) = 2,27 \text{ руб.}$$

Затраты на электрическую энергию для технологических целей определяют по формуле:

$$\Xi = \frac{C_3}{N} \times \frac{P \times \Phi_{\partial} \times K_{\epsilon} \times K_p}{\eta}$$

где :

C_3 - цена 1кВт·ч электрической энергии ($C_3 = 1,23 \text{ руб./кВтч}$);

P - суммарная мощность технологического оборудования, кВт ($P = 1,8 \text{ кВт}$) ;

Φ_{∂} - действительный годовой фонд времени работы технологического оборудования, ч; ($\Phi_{\partial} = 1863$ ч.)

K_E - коэффициент использования технологического оборудования во времени ($K_E=0,5 \dots 0,75$) принято ($K_E=0,5$);

K_p - средний коэффициент использования установочной мощности ($K_p=0,5 \dots 0,8$) принято ($K_p=0,75$);

η - средний коэффициент полезного действия технологического оборудования ($\eta = 0,75$);

$$\Xi = (1,23 / 500) \cdot (1,8 \cdot 1863 \cdot 0,5 \cdot 0,75) / 0,75 = 4,12$$

Затраты на воду и сжатый воздух для технологических целей составляют :

$$C_{вс}=0,12 \text{ руб.}$$

Расходы, связанные с организацией производства и управлением определяются по формуле: $ОПУ = (2 \dots 3) \cdot ЗП$.

$$ОПУ = 2 \cdot 185,64 = 371,28 \text{ руб.}$$

Себестоимость восстановления в окончательном виде:

$$C_b = 6,15 + 185,64 + 3,34 + 2,27 + 4,12 + 0,12 + 371,28 = 709,01 \text{ руб.}$$

Годовая экономия:

$$\Delta C = (c_2 - C_{\partial}) \cdot w$$

где c_2 - себестоимость ремонта радиатора по базовой технологии, руб.

$$\Delta C = (1338,00 - 709,01) \cdot 500 = 314\,500 \text{ руб.}$$

Показатели технико-экономической эффективности приведены в таблице 5.2

Таблица 5.2

Показатели технико-экономической эффективности при восстановлении радиаторов с использованием электроискрового легирования.

№	Наименование показателя	Показатель (руб.)	Показатель (\$)
1	Годовой объем ремонта радиаторов, шт.	500	47
2	Себестоимость ремонта радиатора руб.	709, 01	67,52
3	Объем дополнительных капитальных вложений, руб.	37 910	3610,47
4	Годовая экономия, руб.	314 500	29952

5.4 Исследование абразивных возможностей покрытий, полученных с помощью электроискрового легирования на алюминиевом сплаве Д1.

Одним из методов использования покрытия, полученного на алюминиевых деталях методом электроискрового легирования, является изготовление и восстановление абразивного инструмента для шлифовки стальных деталей, а так же для заточки и доводки режущего инструмента.

В качестве инструмента для шлифования были изготовлены круги из сплава Д1, подобные алмазным, (рис 5.7) и на торцы которых вручную наносилось покрытие электродами из сплава Al-Sn в один слой.



Рис 5.7 Диски из сплава Д1 с нанесенным покрытием.

Для испытания путём шлифования была выбрана сталь 45, закалённая до твёрдости HRC 55 единиц. Стержень из этой стали устанавливался в патрон токарного станка с возможностью вращения с заданной скоростью (рис.5.7) В резцедержателе токарного станка с помощью специального устройства закреплялась шлиф-машинка (рис.5.7), на вращающейся оси которой устанавливался круг с нанесённым ЭИЛ слоем покрытия. Шлиф -

машинка обеспечивала вращения круга со скоростью 200-11000 об/мин. При испытаниях использовалась скорость 11000 об/мин..

Технология испытания состояла в следующем: стержень был разделён на четыре части; первая часть не шлифовалась, так как на этой части необходимо было проверять исходную шероховатость после механической обработки; на втором отрезке стержня был сделан один проход шлифовального круга, на третьем отрезке было сделано два прохода, на четвёртом отрезке-три прохода шлифовального круга.



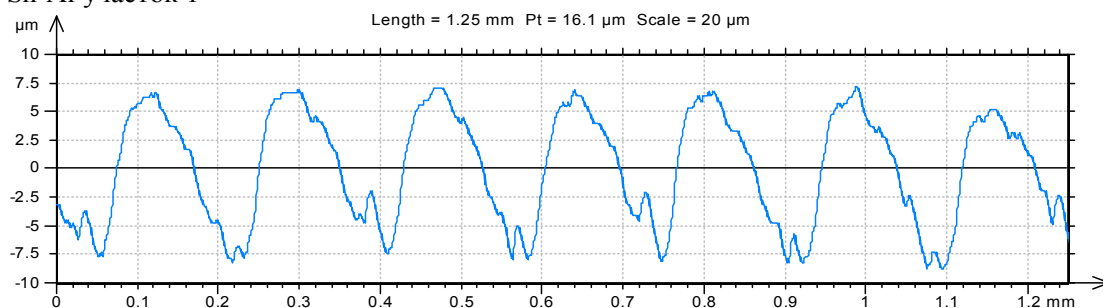
Рис. 5.8 Испытания абразивных свойств покрытия при шлифовке стального закаленного образца.

Шлифование проводилось всухую, без применения смазочно- охлаждающей жидкости. После шлифовки стержень снимался со станка и производился замер шероховатости по Ra всех четырёх поверхностей стержня с помощью профилометра-профилографа Sutronic, Taulor Hobson, GB.

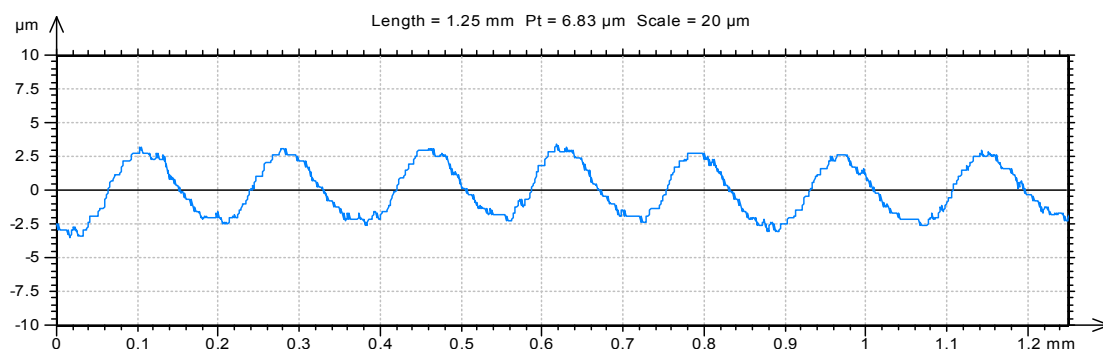
Результаты замеров показали следующее: при исходной шероховатости в среднем Ra 5,6 мкм на всех шлифованных поверхностях отмечено снижение шероховатости до 1,4-1,6 мкм.(Первый отрезок- без обработки -5.0-5.6 мкм., второй отрезок- 3,0-3.6мкм., третий

отрезок-1,6-1,8 мкм., четвёртый отрезок-1,4-1,6 мкм.) Профилограмма замера шероховатости приведена на рис.5.9.

Валик Sn-Al участок 1



Валик Sn-Al участок 4



Участок 1	Участок 4
Roughness profile	Roughness profile
Rz 12.2 µm	Rz 4.53 µm
Ra 3.33 µm	Ra 1.27 µm
Material Ratio parameters	Material Ratio parameters
Rmr 5.56%	Rmr 21.9%
Rdc 8.09 µm	Rdc 3.04 µm

Рис.5.9 Шероховатость образца до и после испытаний

Вполне очевидно, что необходимо провести дополнительные исследования с целью определения необходимых скоростей шлифования (вращения детали, перемещения суппорта и т. д.), оптимальной толщины наносимого слоя покрытия и т. д.

Учитывая небольшой по толщине слой покрытия, в будущем следует отдать предпочтение не шлифовке, при которой необходимо сглаживать грубые риски, оставшиеся от предыдущей механической обработки, а полировке деталей после шлифовки, где поверхность детали имеет более низкую шероховатость. Кроме того, следует исследовать

возможность применения смазочно–охлаждающей жидкости с определением её оптимального состава, расхода и т.д.

В целом по результатам проведённого эксперимента можно сказать, что с научной точки зрения достигнут положительный результат, так как эксперимент доказал, что покрытие на алюминиевом сплаве Д1, полученное нанесением слоя из алюминиево-оловянного сплава с помощью электроискрового легирования, может шлифовать закалённую сталь.

5.5 Заключение и выводы

1. Разработана технология восстановления посадочных мест под подшипники в деталях из алюминиевых сплавов с помощью электроискрового легирования. Для увеличения толщины покрытия использована технология «барьерных» слоев, включающая нанесение нескольких слоев электродами из сплава Al-Sn, с промежуточным нанесением слоев электродами из сплава Al-Ni.

На технологию получен патент ПМР на изобретение №458 от 08.07.14 «Способ легирования поверхности алюминиевого изделия» (см. Приложение №6).

Технология принята к внедрению на предприятиях ДООО «Молдавизолит РиО», ООО «Торговый проект». (Акт внедрения см. Приложение № 4 ÷ 5)

2. Разработана технология ремонта трубчатых сердцевин алюминиевых радиаторов автомобильных и тракторных двигателей с помощью комбинированной обработки электроискровым легированием и низкотемпературной пайки. Сущность технологии заключается в подготовке поверхности алюминиевой детали под пайку путем нанесения покрытия методом электроискрового легирования из сплава Al-Sn. На технологию получен патент ПМР на изобретение № 457 от 21.05.2014 «Способ пайки алюминиевых изделий» (см. Приложение №7).

Технология принята к внедрению на предприятии ООО ПКП «Современные технологии» (Акт внедрения см. Приложение №3).

3. Расчет экономической эффективности показал, что условная годовая экономия при годовом объеме ремонта радиаторов 500 шт. составляет 314 500 руб. или 29 952 \$.

4. Показано, что возможно использование износостойких покрытий, полученных методом электроискрового легирования с обрабатывающим электродом из сплава Al-Sn для получения рабочей поверхности инструментов для абразивной обработки деталей из стали закаленной до твердости HRC 55 единиц.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Объектом исследования настоящей работы были методы формирования и свойства покрытий, полученных методом электроискрового легирования, нанесением на матрицу из алюминиевого сплава (Д1) обрабатывающими электродами из сплавов Al-Sn, Al-Pb, Al-Ni, а также применение вышеуказанных методов для разработки технологии восстановления поверхностей деталей из алюминиевых сплавов.

Решенная научная проблема: Доказана возможность получения с использованием метода электроискрового легирования на Al сплавах покрытий повышенной толщины, что является следствием образования в процессе электроискрового легирования обрабатывающими электродами из сплава Al с легкоплавким компонентом (Sn, Pb) микро- и нанонитей легкоплавкого компонента и его оксидов.

Внедрение и практическая значимость работы: на основании результатов исследований была разработана технология ремонта посадочных мест под подшипники для корпусных деталей автотракторной техники из алюминиевых сплавов и внедрена на предприятиях ДООО «Молдавизолит РиО», ООО ПКП «Современные технологии», ООО «Торговый проект» в г.Тирасполь.

Решение вышеуказанной научной проблемы и получение результатов, обладающих практической значимостью, было осуществлено на основе следующих результатов исследований и разработок:

1. Установлено, что в условиях электроискрового легирования сплавами, представляющими механическую смесь легкоплавкого компонента, диспергированного в тугоплавком (системы Al-Sn, Al-Pb), возможно образование на обработанной поверхности микро – и нанонитей, состоящих из легкоплавкого компонента и его оксидов, образующегося в процессе переноса с анода, благодаря чему получается нанокомпозит, обладающий высокой износостойкостью [183]. Предложенный метод можно рассматривать как аналог электроспиннинга – метода получения нанонитей из расплавов и полимеров в электрическом поле.

2. Показано, что в условиях трения, как со смазкой, так и без, на поверхности покрытий, полученных на алюминиевом сплаве Д1 с помощью электроискрового легирования электродами из сплава AlSn, износостойкость в несколько раз превышает износостойкость закаленной стали. Установлено, что наблюдаемый эффект обеспечивается наличием в покрытии оксидов олова в виде микро- и нанонитей [184].

3. В условиях электроискрового легирования исследована зависимость массопереноса обрабатывающего электрода из сплава Al-Sn в зависимости от скорости его

движения относительно обрабатываемой поверхности. Показано, что максимальный массоперенос в условиях механизированного нанесения покрытий наблюдается при низкой скорости перемещения обрабатывающего электрода относительно образца ($<1,5 \cdot 10^{-3}$ м/с) При более высоких скоростях перемещения массоперенос практически отсутствует и наблюдается только модифицирование поверхностного слоя. [185]

4. В условиях электроискрового легирования при механизированном нанесении исследована зависимость шероховатости получаемой поверхности от скорости движения обрабатывающего электрода. Показано, что с увеличением скорости движения обрабатывающего электрода относительно обрабатываемой поверхности, шероховатость полученного покрытия снижается, а износостойкость растет.[185]

5. Установлено, что в результате испытаний в относительно «мягких» условиях трения (невысокая нагрузка при относительно низкой скорости) определяющую роль в повышении износостойкости покрытия играют микро - и нанонити из оксидов олова, а в условиях «жестких» испытаний (высокая нагрузка и высокая скорость) роль микро - и нанонитей нивелируется, и определяющую роль играет обработанная методом электроискрового легирования матрица. Показано, что микротвердость покрытия при трении без смазки при «жестких» условиях испытаний увеличивается за счет изменения структуры покрытия с образованием оксидов элементов.[186].

6. Показано, что в процессе электроискрового легирования обрабатывающим электродом AlSn происходит окисление его поверхности и обогащение элементами электрода-образца что диктует необходимость периодического восстановления поверхности обрабатывающего электрода [187].

7. Исследована возможность получения слоя покрытия повышенной толщины с применением технологии многослойных покрытий с периодическим нанесением «барьерных слоёв». В качестве «барьерного слоя» среди исследованных сплавов (Al-Zn, Al-Cu, Al-Ni и др.) наилучшими свойствами обладает сплав Al-Ni , позволяющий получать покрытия толщиной до $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. По результатам исследования разработана технология восстановления геометрической формы изношенных алюминиевых деталей. [188]

8. Разработанный технологический процесс внедрен в производство на предприятиях Приднестровья, а так же в учебный процесс Инженерно-технического института Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь. (Акт внедрения см. Приложение №2)

Работы выполнены на основании программ бюджетного финансирования АН Молдовы № 11.817.05.05А "Электрофизикохимические методы получения и обработки новых материалов и покрытий, обладающих улучшенными функциональными свойствами"(2011-2014гг),

№ 15.817.02.05.А "Физико-химические методы и инженерные аспекты получения новых материалов и поверхностей для многомасштабных технологий"(2015-2018 гг),

европейская Программа IRSES (Проект Oil@Sugar, GA № 295202),

а также частично при бюджетном финансировании Приднестровского государственного университета им. Т.Г.Шевченко.

ЛИТЕРАТУРА

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. Смирягин, А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы. Москва: Металлургиздат, 1956. 560 с.
4. Арзамасов П.Л. Материаловедение: Справочник. Москва: изд. МГТУ, 2002. 653с.
5. Трухов А.П, Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. Москва: Изд. Академия ISBL, 2004. 336 с.
6. Фетисов Г.П. и др. Материаловедение и технология металлов. Москва: ГУП «Издательство «Высшая школа»», 2001. 421 с.
7. Бурумкулов Ф.Х. и др. Формирование наноструктурных электроискровых покрытий на стали 20Х. Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем. Материалы Всероссийской научно- технической конференции. Саранск: изд. Мордовского университета. 2003 г.
8. Белов Н.А., Золотаревский В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. Москва: МИСИС, 2005. 376 с.
9. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А., Хворостухин Л.А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. Москва, 1998. 98 с.
10. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. Москва: Изд. АН СССР, 1959. С.56.
11. Белый А.В., Макушок Е.М., Поболь И.Л. Поверхностная и упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. Минск: «Навука і тэхніка», 1990. 79 с.
12. Комаров Ф.Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твёрдые тела Минск: УП Технопринт, 2001. 392 с.
13. Manakova O. S., Kudryashov A. E. Levashov E. A. On the application of dispersion-hardened SHS electrode materials based on (Ti, Zr)C carbide using electrospark deposition. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2015, Vol. 51, Issue 5, pp. 413-421
14. 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.

15. Ribalko A.V., Sahin O. A modern representation of the behaviour of electrospark alloying of steel by hard alloy. In :Surface & Coatings Technology, 2006, V 201 P.1724–1730
16. Mikhailyuk A. N., Volodina G. F. Structure-phase transformations in electrospark iron-carbon surfaces at different heating temperatures. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010, Vol. 46, Issue 6, pp.579-581.
17. Мубоджян С.А., Кабалов Е.Н., Буденовский С.А., Помелов А.Я. Нанесение защитных покрытий на детали ионно – плазменным методом. In: Авиационная промышленность, 1999, №3, С.65-70.
18. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) Москва: Экомет, 2005. 298 с.
19. Ryachin S. A., Burkov A. A. Formation of intermetallic coatings by electrospark deposition of titanium and aluminum on a steel substrate. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015, Vol. 51, Issue 2, pp 118-124.
20. Дальский Ф.М., Барсукова Т.М., Бухаркина Л.Н., и др. Обработка конструкционных материалов. Москва: Машиностроение, 2004. 512 с.
21. 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.
22. Аверьянов Е.Е. Плазменное анодирование в радиоэлектронике. Москва: Радио и связь, 1983. 78 с.
23. Шандров Б.В., Морозов Е.М., Жуковский А.В. Основы технологии микродугового оксидирования. Москва: Альянс, 2008. 80 с.
24. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Современный уровень развития электроискровой обработки металлов. In: Электроискровая обработка металлов. Москва: Изд. АН СССР, 1957. вып. 1-9 -37. С.58.
25. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей Москва: Изд. АН СССР. 1958. С. 59.
26. Lazarenko B.R., Lazarenko N.I., Electrospark Machining of Metals Consulting Bureau. NewYork, USA, 1964, 128p.
27. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Физика электроискрового способа обработки материалов. М.: ЦБТИ МЭП. 1946
28. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Распределение элементов в поверхностных слоях при электроискровом легировании. In: Электронная обработка материалов, 1977, №3, С.28- 33.

29. Лазаренко Н.И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде. In: Электроискровая обработка металлов. Москва: Изд-во АН СССР, 1957. Вып.1. С.79-94.
30. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей. In: Электронная обработка материалов, 1965. №1 С.49-53
31. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Москва: Машиностроение, 1976. 67с.
32. Лазаренко Н.И., Разумов З.П. Механизация процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. In: Электронная обработка материалов, 1975, №2, С.36.
33. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я., Игнатьков Д.А. Об ограничении толщины слоев, формируемых в процессе электроискрового легирования. In: Электронная обработка материалов, 1981. №3 С.25-29.
34. Лазаренко Н.И., Чатынян Л.А., Овселян Т.И. Электроискровой способ легирования металлических поверхностей применительно к деталям трения. In: кн.: Материалы для деталей узлов трения. Москва: ОНТИ 1971 С. 44 – 56, 66.
35. Lazarenko B.R. Lazarenko N.I. Electrosark Machining of Metals Consulting Bureau. NewYork. USA 1964, 128p.
36. Хабибулина Н.В., Плешкова Е.В. Электроискровое легирование медицинских инструментов. In: Электронная обработка материалов, 1977, №3, С.37-38.
37. Николенко С.В. и др. Исследование модифицированного поверхностного слоя стали 35 после электроискрового легирования. In: Вопросы металловедения, 2007, №2, С.53-59.
38. Николенко С.В. Наноструктурирование поверхности стали 35 электроискровой обработкой новыми электродными материалами на основе карбида вольфрама с добавкой Al_2O_3 . In: Вестник машиностроения, 2011, №6, С.47-51.
39. Nikolenko S. V. Nanostructuring a steel surface by electrosark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011, Vol. 47, Issue 3, pp 217-224.
40. Dicusar A.I. Obtaining Nanowires under Conditions of Electrodischarge Treatment. In Nanowires-Implementations and Applications Edited by Abbass Hashim Croatia 2011 pp.357-374.
41. Parkansky N.Y., Boxman R.I., Goldsmith S. Development and Application of Pulsed-Air-

Arc Deposition. Surf Coat. Techn. 1993 Vol 6. Pp.268-273.

42. Абрамчук А.П. и др. Закономерности электроискрового легирования алюминия и его сплавов порошковыми материалами. In: Электронная обработка материалов, 1990, №2, С.20-23.
43. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D., Syui N.A. Generation and study of new electrode materials with self-fluxing additives to improve the efficiency of mechanical electrospark alloying. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015, Vol. 51, Issue 1, pp 38-45.
44. Крушенко Г.Г. Нанотехнологии в конструкционных сплавах . Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение. Труды научно- технической конференции. Ставеровские чтения: Красноярск. Сибирский федеральный университет. КНИЦ, 2009. С.268-272.
45. Gitlevich A.E. and oth. Electric Spark Allouing of Metal Surfaces. Kishinev. Stiintsa, 1985. 196 p.
46. Gitlevich A.E., Mikhailyuk A.I. and Mikhailov V.V. Electrode processes during electrospark alloying – transformations at the cathode. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 1995, №3, pp 16-32
47. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. 303 с.
48. Ivanov V. I., Burumkulov F. Kh., On electrodeposition of thick coatings of increased ontinuity. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014, Vol. 50, Issue 5, pp 377-383.
49. Ivanov V. I., Burumkulov F. Kh. Hardening of objects and the increase of their lifetime by the electrospark method: The object classification and the specific features of the technology. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry.2010, Vol. 46, Issue 5, pp. 416-423.
50. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологий. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2010. 432 с.
51. Paustovskii A. V. and oth.. Optimization of the composition, structure, and properties of electrode materials and electrospark coatings for strengthening and reconditioningof metal surfaces. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013 Vol. 49, Issue 1, pp 4-12.
52. Paustovskii A. V. and oth. A study of the dependence of the mass transfer on the structural

- factors of the electrodes in electrospark alloying with Ni-Cr-Al alloys. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011, Vol. 47. Issue 1. pp. 23-27.
53. Оськин В.А., Евсиков В.В. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Книга 1. Москва: "КолосС", 2008. 448с.
 54. Золотых Б.Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. Москва: Изд. технико-теоретической литературы, 1953. 107 с.
 55. Шумахер Б. Законы проникновения электронов в вещество. Приводится по: Электронно – ионно - лучевая технология, Москва: Металлургия. 1967. С.42-45.
 56. Судзуки К. Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. Москва: Металлургия, 1987. С 328.
 57. Mikhailov V. V. and oth. Electrospark alloying of titanium and its alloys: The physical, technological, and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013. Vol. 49, Issue 5, pp 373-395.
 58. Абраменко С.В., Коротких М.Т. Повышение износостойкости режущих инструментов и деталей машин электроискровой обработкой в гетерогенных средах. Современное машиностроение. Сборник трудов молодых учёных. Выпуск 1. Санкт-Петербург. Санкт-Петербургский институт машиностроения. 1999. 238с.
 59. Sarantsev V. V., Markova L. V. Azarenko E. L. Study of composite spark-alloyed coatings based on titanium carbide using self-propagating high-temperature synthesis. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2012, Vol. 48, Issue 2, pp 127-132.
 60. Харламов Е.И. Разработка метода термореакционного электроискрового упрочнения. Диссертация. к.т.н., Москва, 2001.
 61. Харламов Е. И. и др. Особенности формирования покрытий на основе боридов титана в процессе термореакционного электроискрового упрочнения. In: Цветные металлы. 2000 . №2. С.8-13.
 62. Nandana Bhardwaj, Subhas C.Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. In : Biotechnology Advances, 2010, v28, pp.325-347.
 63. Левашов Е.А. и др. Термореакционное электроискровое поверхностное упрочнение с использованием шихтовых электродов. In: Известия ВУЗов. Цв. Мет, 1998, №2, С.39-46.
 64. Ostermann F. Anwendungstechnologie Aluminium. Aufl. Springer Berlin/New York, 2007. S. 581 (eingeschränkte Vorschau in der Google Buchsuche).

65. Богинский Л.С. Саранцев В.Ю., Хина Б.Б. Получение электродов для электроискрового легирования деталей с обмазками с использованием технологии сухого изостатического прессования и СВС. In: Техника машиностроения, 2002. №4.
66. Panteleenko F. I. and oth. Formation of composite coatings based on titanium carbide via electrospark alloying. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011, Vol. 47, Issue 4. pp. 328-337.
67. Каратаев Д.Н. Влияние газовых сред на технологические возможности электроискрового легирования. Диссертация к.т.н., Москва, 1998.
68. Paustovskii A. V. and oth. Development of electrode materials for electrospark hardening and reconditioning of worn-out surfaces: The structure and properties of the coatings. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011, Vol. 47, Issue 2. pp. 126-131.
69. Гнесин Б.А. Электроискровое легирование поверхности на углеродистых сталях и чугунах с помощью электродов из силицидов молибдена и вольфрама. In: Материаловедение, 2007, №7, С.41-45.
70. Палатник Л.С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий. Доклад АН СССР. 1953 т.89. №3. С.455-458.
71. Золотых Б.Н., Круглов А.Н. Тепловые процессы на поверхности электродов при электроискровой обработке металлов. Электроискровая обработка материалов, вып.1. Изд. АН СССР. 1957. С38-69.
72. Mikhailyuk A. I., Gitlevich A. E. Application of graphite in electrospark technologies. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010, Vol. 46. Issue 5. pp. 424-430.
73. Мицкевич М.К., Бакуто И.А. Электроискровой способ нанесения локальных толстослойных покрытий. In: Электронная обработка материалов, 1977, №4, С.29.
74. Chigrinova N. M., Kuleshov A. A., Nelaev V. V. Microplasma spark alloying with ultrasonic surface modifying. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010, Vol. 46, Issue 2. pp. 108-114.
75. Chigrinova N. M. Theoretical model of the engineering of metal surfaces by microplasma spark alloying with the alternative intensity of the mechanical impact. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry 2010, Vol. 46. Issue 1. pp. 21-26.
76. Давыдов В.М., Ледков Е.А., Никитенко А.В. Изменение температуры анодов в процессе электроискровой обработки. Новые технологии и материалы. Инновации в

промышленность Дальнего Востока ГОУВПО КнАГТУ, 2007.

77. Либензон Г.А. Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии Москва: Металлургия, 2001. 320с.
78. Paramonov A. M., Koval A. V. New potentials of the electrospark alloying method for prolonging the service life of cutting tools. In: Surface Engineering and Applied
79. Беккер М.Б., Заславский М.Л., Игнатенко Ю.Ф. Литье под давлением. Москва: Машиностроение, 1990. 400с.
80. Verkhoturov A. D., Podchernyaeva I. A., Konevtsov L. A. Spark alloying using metals and ZrB₂-based ceramics of tungsten-containing hard alloys for increasing serviceability. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2007, Vol. 43, Issue 6, pp. 415-424.
81. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. А.И.Гусев, Екатеринбург: УРО РАН. 1998. 168 с.
82. Jelinek T.W. Oberflächenbehandlung von Aluminium 1997, 328 s.
83. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение. Санкт-Петербург: Химиздат, 2007. 784с.
84. Карабасов Ю.С. Новые материалы. Москва: МИСИС, 2002. 727с.
85. Левашов Е.А. и др. О влиянии нанокристаллических порошков на процесс формирования, структуру и свойства электроискровых покрытий на основе электродного материала системы Ti-B-Al. In: Цветные металлы, 2002, №4, С.62.
86. Bohme W. Standzeiterhöhung von Werkzeugung mittels des Elektrofunkverfahrens Fertigungstechnik und Betrieb, 1964, N 12, S. 757-760.
87. Hanke E. Standzeiterhöhung durch partiell Hartung im Funken Fertigungstechnik 1957, Bd. N 3, S. 124-125.
88. Пячин С.А, Заводинский В.Г., Пугачевски М.А. Перенос металлов с анода на катод при электроискровом воздействии. In: Упрочняющие технологии и покрытия, 2007, №11, С.7-13.
89. Eslinger P. Eigenschaften von aluminium legierungen nach sehr rascher erstarrung. Z Metallkunde, 1966. №1.
90. Левашов Е.А. и др. Перспективы применения технологии электроискрового легирования и СВС-электродных материалов в современной промышленности. Материалы 5 Международной практической конференции – выставки «Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Россия Санкт-Петербург: Изд. СПбГПУ, 2003. С.165-178.
91. Левашов Е.А. и др. Особенности влияния нанокристаллических порошков на

- структуру и свойства сплава TiC-Ti₃AlC₂, полученного методом СВС. In: Физика металлов и металловедение, том 95, 2003, № 6, С.58-64.
92. Feldshtein E. E., Kardapolova M. A., Gaida R., Khorodyski B., Kavalchuk O. V. Tribological properties of electrospark-deposited and further laser-hardened coatings Journal of Friction and Wear 2013. Issue 2. P. 137-141
93. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Малочкин О.В. О влиянии нанокристаллических порошков на процесс формирования, структуру и свойства электроискровых покрытий на основе титанохромового карбида. In: Известия ВУЗов. Цветная металлургия, 2001, №3, С.44-51.
94. Левашов Е.А. Перспективы применения сплава СТИМ-3Б, модифицированного нанокристаллическим порошком ZrO₂, в технологии электроискрового легирования. In: Известия ВУЗов. Цветная Металлургия, 2000, № 5, С.68-72.
95. 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.
96. Galinov V. V., Luban R.B. Mass transfer trends during electrospark alloying Surface and Coatings Technology Institute for Problems of Materials Science of the Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine. P. 9-18.
97. Подлесов В.В. и др. Электроискровое легирование сталей электродными материалами TiC - интерметаллид. Свойства электродов и нанесение покрытий. In: Электронная обработка материалов, 1995, № 3 (183), С.9-12 .
98. Котов Н.М. и др. Электроэрозионное легирование (ЭЭЛ) быстрорежущих сталей электродными материалами на основе карбида титана и интерметаллидов: массоперенос, структура и свойства покрытий. Материалы международного юбилейного симпозиума по электроэрозионной обработке. “НПС Техномаш”, Москва, 1993. С.46-47.
99. Международный патент № W099/18258. Россия, США, Германия, Франция, Великобритания. Левашов Е.А. и др. Электродный материал для осаждения суперабразивных покрытий и способ их получения. Оpubл. 03.10.97.
100. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Погожев Ю.С. и др. Особенности формирования наноструктурированных электроискровых защитных покрытий на титановом сплаве при использовании дисперсно-упрочненных наночастицами электродных материалов системы TiC-Ti₃AlC₂. In: Известия ВУЗов. Цветная металлургия, № 5, 2007, С.54.

101. Кудряшов А.Е. и др. Перспективы применения модифицированных и наноструктурных электродных материалов в технологии электроискрового легирования. Материалы международного симпозиума (3 Самсоновские чтения). Хабаровск, 2006. С.200-201.
102. Замулаева Е.И. и др. Упрочнение деталей и инструмента методом электроискрового легирования с применением новых электродных материалов. Материалы 8 Межд. практической конференции – выставки «Технологии ремонта, восстановления, упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки, ч.2, Санкт-Петербург. Изд. Политехнического университета, 2006. С.200- 209.
103. Замулаева Е.И. и др. Нанодисперсный материал состава WC-8% Co для технологии электроискрового легирования и свойства формируемых покрытий. Тезисы 7 Международной научно-практической конференции «Человек и космос», Днепропетровск, Национальное космическое агентство Украины.Национальный центр аэрокосмического образования молодежи Украины (НЦАОМУ), 2005. 342 с.
104. Podlesov V.V., Kudryashov A.E., Levashov E.A. Electrosark alloying of steels by TiC-intermetallic compound electrode materials. 1. Properties of electrodes and application of eocoatings. In: Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 1995, №3, pp 10-15
105. Левашов Е.А. и др. Исследование влияния параметров импульсных разрядов на массоперенос, структуру, состав и свойства электроискровых покрытий на основе TiC-NiAl, модифицированных нанодисперсными компонентами. In: Известия ВУЗов. Цветная металлургия, 2004, № 6, С.39-46.
106. Gammel F., Suchentrunk R., Kudryashov A., Levashov E., Malochkin O. Effect of Nanosized Powders on the Structure and Properties of Electrosark Alloyed Coatings Springer Science+Business Media, 2001. 1064-7562.
107. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей. Москва: Изд. АН СССР, 1958. 177 с.
108. 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.
109. Золотых Б.Н., Коробова И.П., Старыгин Э.М. О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде. Физические основы электроискровой обработки материалов. Москва: Наука, 1966. С.63-72.
110. Kornienko L., Chernova G., Mihailov V., Gitlevich A. Use of the electrosark alloying

method to increase the corrosion resistance of a titanium surface. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, Vol. 47. No.1. (1 February 2011). P. 9-17

111. Самсонов Г.В., и др. Физико-химические свойства и перспективы применения безвольфрамовых твердых сплавов Приводится по : Технология изготовления изделий из твердосплавных смесей. Киев: Наукова думка, 1973. С.42-46.
112. Samsonov G.V., Verchoturov. A.D., Bovkun G.A., Sitchev V.S. Spark Discharge Doping. Kiev. Nauka 1976. С.219.
113. Верхотуров А.Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. Владивосток: Дальнаука, 1992. 180 с.
114. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
115. Верхотуров А.Д., Муха И.М.. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев:Техника, 1982. 184 с.
116. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А. Эрозия тугоплавких материалов при воздействии концентрированных потоков энергии. Владивосток: ДВО РАН СССР, 1987. 64 с.
117. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Куриленко Н.Н. Формирование вторичной структуры на аноде в процессе электроискрового легирования. In:Электронная обработка материалов, 1987, №1, С.26-32.
118. Верхотуров А.Д, и др. Электродные материалы для электроискрового легирования. Москва: Наука, 1988. 224 с.
119. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. Владивосток: Дальнаука, 2005. 218 с.
120. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Комарова Г.П. Закономерности образования измененного поверхностного слоя при электроискровом легировании. In: Упрочняющие технологии и покрытия, 2008, №4, С.28-32.
121. Мулин Ю.И. и др. Исследование износостойких несплошных покрытий, образованных электроискровым легированием. In: Трение и износ, 2004. №6. С.650-655.
122. Мулин Ю.И., Вишневский А.Н., Метлицкая Л.П. Исследование процесса образования толстослойных покрытий методом электроискрового легирования. Приводится по: Принципы и процессы создания неорганических материалов. Хабаровск, 2002, С.217- 218.
123. Pereteatsu Pavel. Интенсификация процесса электроискрового легирования при

воздействии внешних источников энергии: Автореф.диссертации. д-ра техн. наук . Кишинев, 2008. 35с.

124. 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.
125. 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.
126. Бурумкулов Ф.Х., Лялякин В.П., Иванов В.И., Черкасов В.В. Восстановление и упрочнение деталей и инструментов концентрированным источником тепла. In: Ремонт, восстановление, модернизация, 2003, №9, С.35-39.
127. Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Н.М., Пушкин И.А. Микрогеометрия и несущая способность поверхности, образованная электроискровой наплавкой. In: Технология машиностроения, 2001, №4, С.29-36.
128. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н. И. Электрическая теория искровой электрической эрозии металлов. Приводится по: Проблемы электрической обработки материалов. Москва: Изд. АН СССР, 1962. С. 44—51.
129. Sheldon G. L., Tribol J. Gallling Resistant Surfaces on Stainless Steel Through Electrospark Alloying 117(2).(Apr 01, 1995). P. 343-349.
130. Мицкевич М.К., Бунин А.И., Бакуто И.А. и др. Изучение динамики процесса переноса материала электрода в сильноточном импульсном разряде. In: Электронная обработка материалов, 1977, №4, С.18-19.
131. Коваленко В. С., Швец О. И., Головки Л. Ф. и др. О влиянии размерного фактора на процесс упрочнения деталей непрерывным лазерным излучением. In: Электронная обработка материалов, 1986, № 1, С. 23—25.
132. Золотых Б.Н. К вопросу о механизме электрической эрозии в жидкой диэлектрической среде. In: Журнал технической физики 1959, т. 29, С. 1484—1486.
133. Korotkov V., Trekin G., Kabanov D. Electrospark Alloying: Process and Properties, 2001. P 235-239.
134. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования. In: Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1983, № 1, С. 3—5.
135. Раховский В. И., Ягудаев А.М. К вопросу о механизме разрушения электродов в импульсном разряде в вакууме. In: Журнал технической физики, 1969. т. 39, №2, С.317.

136. Антонов В.Т. Сущность, основные закономерности и группа установок для применения метода локального нанесения покрытий из металлов и сплавов. Докл. Всемир. электротехн. конф. Москва: Наука, 1977. С.18-20.
137. Зитка В.Н. Влияние физических свойств электродного материала на перемещение веществ, при коротких сосредоточенных разрядах в диэлектрической среде. In: Чехосл. Физический журнал, 1963, т.3, С. 94-96.
138. Ribalko A.V., Sahin O., Korkmaz K. A modified electrospark alloying method for low surface roughness. In :Surface & Coatings Technology, 2009, V 203 P. 3509–3515.
139. Афанасьев Н.В., Капельян С.Н., Филипов Л.П. Некоторые особенности электрического разрушения электродов при разрядах в газовой и жидкой средах. In: Электронная обработка материалов, 1970, №1, С.3-8.
140. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Москва: Машиностроение, 1976. 44с.
141. Goldshmit M.I. The constitution of spark-treated metals. Iron and Steel, №24. P.469-471.
142. Zeilinski E. Einfub und praktische Anwendung der Legierungselemente bei Stahl und Gubeisen - Technica (Suisse) 1966. Bd. 15. N 6. S. 538-540.
143. Коваленко В.С. и др. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. Москва: Наука, 1986. 277 с.
144. Абрамчук А.П. и др. Распределение элементов в поверхностных слоях алюминия при электроискровом легировании. In: Электронная обработка материалов, 1988, №6, С.12- 13.
145. Альбински К. Исследование эрозионной устойчивости рабочих электродов при электроискровой и электроимпульсной обработке. In: Станки и инструменты. 1994. №7. С.11-13.
146. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А. Классификация видов электроискрового легирования. In: Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1983, №3, С.5-7.
147. Михайлов В.В., Абрамчук А.П. Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов In: Электронная обработка материалов, 1986, №2, С.36-41.
148. Maksimov V. K., Marchenko L.F. Increasing the wearing qualities of clamping microsurgical instruments by electrospark alloying. Med Tekh., 1988. Mar-Apr; (2):21-4.
149. Сафонов И.И. Исследование возможности применения карбидных и боридных соединений титана, ниобия, циркония и хрома в качестве электродов для электроискрового легирования. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: ИПМ АН

УССР. 26 с.

150. А.с. №474418 (СССР) Способ электроискрового нанесения покрытий. И.А. Бакуто, И.Г.Некрашевич, М.К Мицкевич . 1975. №2.
151. Самсонов Г.В., Лемешко А.Н. Закономерности электроискрового разрушения тугоплавких металлов с углеродом, бором. In: Электронная обработка материалов, 1969, №6, С.3-6.
152. Çakir A., Yilmaz M . S ., A. Ribalko A., Korkmaz K . A Study on Modification of Micro-Alloy Steel Surfaces with Different Hard Materials Via Electro-Spark Deposition Method. Proceedings of the 4th International Congress APMAS2014, 2014, Fethiye, Turkey In: ACTA PHYSICA POLONICA A Vol. 127 №4 P/1410-1413.
153. Topala P. ,Ojegov A.,Ursaki V. Nanostructures obtained using electric discharges at atmospheric pressure. In : Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications, Technology, Propoerties and Devices(ed. I.Tiginyanu, P.Topala, V.Ursaki Springer 2016, pp. 43-83.
154. Канавина Н.Г., Спивак Г.В. Электронно –микроскопическое изучение структурных изменений при электроэрозии. In: Изв. АН СССР. Сер. физ. 1951. Т.15, вып.2, С.72-76.
155. Мичурина К.А., Прилежаева И.Н., Спивак Г.В. Электронно – микроскопическое изучение структурных изменений алюминия при электроэрозии. In: Изв. АН СССР, Сер физ.1951. т 15. №4 С.418-423.
156. Морозенко В.Н., Назарец В.С., Тимошенко В.И и др. Термосиловое действие электрического разряда при электроискровом легировании. In: Электронная обработка материалов. 1973. №4 С.24-26.
157. Topala P., Slatineanu L.,Stoicev P. Physical and chemical processes during the machining by means of the electro-erosie metod. Nonconventional Technologies Review, 2010.№1 P.50-54
158. Мотовилин Г.В., Масино М.А., Суворов О.М. Автомобильные материалы. Справочник. Москва: Транспорт, 1989. С 147.
159. Иванов В.Н., Казенников С.А., Курчман Б.С., Лященко Н.Н. и др. Литье по выплавляемым моделям. Москва: Машиностроение, 1984. С. 246.
160. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рыжов Н.М. и др. Материаловедение: Учебник для вузов. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. С.363.
161. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. Москва: «Металлургия», 1979. С.256.
162. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск: «Наука», 1986. 198 с.

163. Brevet de inventie MD 2966 C1: G01N. Instalatie de incercare a materialelor la frecare / V.Agafii, V.Parsutin (MD), Cerera depusa 19.02.2006, BOPI nr 1/2006.
164. Лебедева С.И. Определение микротвердости минералов. Москва: Изд. АН СССР, 1963. 104 с.
165. Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Москва: Физматгиз, 1959. 755с.
166. Ниженко В.И., Флока А.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов. Справочник. Москва, 1981.
167. Yurchenko V.I., Yurchenko E.V., Fomichev V.M., Baranov S.A., Dikumar A.I. Obtaining of nanovires in conditions of electrodischarge treatment with Al-Sn alloy. Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2009, 45 (4), 259 - 264.
168. Brevet de inventie MD 2966 C1: G01N. Instalatie de incercare a materialelor la frecare / V.Agafii, V.Parsutin (MD), Cerera depusa 19.02.2006, BOPI nr 1/2006.
169. Лазаренко Б.Р. и др. Исследование процесса электроискрового легирования разряженной среде. In: Электронная обработка материалов, 1970, №4, с.13-15.
170. Agafii V.I., Yurchenko V.A., Yurchenko V.I., Fomichev V.M., Petrenko V.I., Dikumar A.I. "Wear Resistance of Coatings Manufacturing by Electric Spark Plating with Al-Sn Electrodes" Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2011, v.47, no 6, pp.488-492.
171. Установка для электроискрового нанесения металлических покрытий ALIER-31 паспорт. Кишинев: SCINTI.
172. Кременский И.Г. Восстановление изношенных отверстий. In: Ремонт, восстановление, Модернизация, №4, 2014г.
173. Канарчук В.Е., Чигринец А.Д., Голяк О.Л. Восстановление автомобильных деталей. Технология и оборудование. Москва: Транспорт, 1995. 303 с.
174. Черноиванов В.И. Восстановление деталей машин. Москва: ГОСНИТИ, 1995. 278 с.
175. Торопов Ю.А. Припуски, допуски и посадки гладких цилиндрических соединений. Припуски и допуски отливок и поковок: справочник. Санкт-Петербург: Изд. «Профессия», 2004. 598 с.
176. Горелик С.С., Скаков Ю.А. и др. Рентгенографический и электронно- оптический анализ. Москва: МИСиС, 1994. 328 с.
177. Иванов В.И. Увеличение толщины электроискровых покрытий Состояние вопроса. Часть 1. Причины ограничения толщины покрытий. Часть 2. Методы увеличения толщины электроискровых покрытий: In: кн.: Труды ГОСНИТИ Москва: ГОСНИТИ, 2013, т 113, С.429-434,450-455.

178. DiBitonto D.D. and oth. Theoretical Models of Electrical Discharge Machining Process.
In: J Appl. Phys 1989 Vol.66. I. A Simple Cathode Erosion Model. No 9 pp.4095- 4103;
II. The Anode Errosion Model pp.4104 – 4111.
179. Авсеевич О.И. О закономерности эрозии при импульсных разрядах. In: кн.
Физические основы электроискровой обработки металлов. Москва: Наука, 1966,
С.63-74.
180. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения
машиностроительных материалов. Учебное пособие-справочник изд.2-е. Киев:
Профессионал, 2006. 352с.
181. Фурсов С.П. и др. Источники питания для электроискрового легирования. Кишинев:
”Штиинца”, 1983. 153 с.
182. Коваленко В.С., Головки Л.Ф. Повышение износостойкости металлорежущих
инструментов с помощью лазерного излучения. In: Технология и организация
производства , 1981, №2, С.42-46.
183. Yurchenko V.I., Yurchenko E.V., Fomichev V.M., Baranov S.A., Dikumar A.I. Obtaining of
Nanowires in Conditions of Electrodischarge Treatment with an AL-SN Alloy. Surface
Engineering and Applied Electrochemistry. 2009, Vol 45 (4). p. 259-264.
184. Agafii V.I., Yurchenko E.V. , Petrenko V.I., Fomichev V.M., Yurchenko V.I., Dikumar A.I..
Electrospark alloying for deposition on aluminum surface of Al-Sn coatings and their wear
resistance under dry friction. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2013. Vol
49 (3). p.1-8.
185. Agafii V.I., Yurchenko E.V., Yurchenko V.I., Petrenko V.I., Dikumar A.I. Deposition of Al-Sn
Nanostructuring Coatings on Aluminum Surface Using Electrospark Alloying and Their
Wear Resistance under Friction in Oil. International conference on Nanotechnologies and
Biomedical Engineering German-Moldovan Worksnop on Novel Nanomaterials for
Electronic, Photonic and Biomedical Applications Proceedings. Chisinau, Moldova April 18-
20. 2013 p. 227-230
186. 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.
187. 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.

188. 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. C.252-255.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи :

1. Yurchenko V.I., Yurchenko E.V., Fomichev V.M., Baranov S.A., Dikusat A.I. Obtaining of Nanowires in Conditions of Electrodischarge Treatment with an Al-Sn Alloy. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2009, Vol 45 (4). p. 259-264.
2. Юрченко В.И., Юрченко Е.В., Фомичев В.М., Агафий В.И., Силкин С.А., Дикусар А.И. Поверхностные слои, полученные при электроискровой обработке алюминиевых поверхностей сплавом Al-Sn и их износостойкость при сухом трении Вестник науки Приднестровья, 2012. №2. С.172-184.
3. Agafii V.I., Yurchenko E.V., Petrenko V.I., Fomichev V.M., Yurchenko V.I., Dikusat A.I. Electrosark alloying for deposition on aluminum surface of Al-Sn coatings and their wear resistance under dry friction. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2013. Vol 49 (3). p.1-8.
4. Юрченко Е.В., Юрченко В.И., Дикусар А.И. Наноструктурирование поверхности из алюминиевых сплавов в условиях электроискрового легирования. Наноинженерия, 2013. №2. С.12-24.
5. Дикусар А.И., Юрченко Е.В. Восстановление и упрочнение алюминиевых деталей наноструктурированием поверхности с помощью ЭИЛ электродами из сплава Al-Sn Труды ГОСНИТИ 2013. т.113 С.354-364.
6. Юрченко Е.В., Иванов В.И. Технологии восстановления деталей из алюминиевых сплавов методом электроискрового легирования. Труды ГОСНИТИ 2014. т.117 С.251-255.
7. Agafii V.I., Yurchenko E.V., Petrenko V.I., Kupcinskas A., Zunda A., Dikusat A.I. Al-Sn Nanostructured Coatings on Aluminum Surfaces Using Electrosark Alloying and Their Wear Behavior Balttrib' 2013. VII International Scientific Conference. Proceedings Kaunas, Lithuania - November 14-15 2013. p. 93-99.
8. Yurchenko E. Application of the Strengthening Nanostructured Coatings Obtained at Electrodischarge Treatment by Tool Electrodes Manufacturing from Al-Sn Alloy. Book

IFMBE Proceedings Vol. 55, 2016, 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering/ ICNBME-2015, September 23-26, 2015, Chisinau, Republic of Moldova p. 105-112.

9. Юрченко Е.В. Увеличение толщины наноструктурированных электроискровых покрытий электродами-инструментами из сплава AlSn20 на алюминиевых поверхностях. LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE VOLUMUL 45 INGINERIE AGRARĂ ȘI TRANSPORT AUTO 2015. C.252-255.

10. E. V. Yurchenko, V. I. Yurchenko, I. V. Yakovets, A. I. Dikusat Changes in Composition and Properties of Tool Electrode during Electrosark Alloying with Al-Sn Alloy. Surface Engineering and Applied Electrochemistry 2016 Vol. 52 (2). p 157-161.

Тезисы докладов и материалы конференций :

1.Юрченко В.И., Юрченко Е.В., Фомичев В.М., Баранов С.А., Дикусар А.И. Получение нанонитей в условиях электроразрядной обработки. Материалы III Международной научно-технической конференции «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей». - Кострома. – 15-17 февраля 2010. С. 287-290.

2. Дикусар А.И., Юрченко В.И., Юрченко В.А., Фомичев В.М., Юрченко Е.В., Агафий В.И. Получение электроискровых покрытий содержащих нанонити оксида олова, и их износостойкость Доклады итоговой научной конференции профессорско-преподавательского состава инженерно-технического института за 2011. Тирасполь. -16-24 января 2012, С 160-171.

3. Юрченко Е.В. Экспериментальное исследование процесса наноструктурирования поверхности алюминиевого сплава Д1 Доклады итоговой научной конференции профессорско-преподавательского состава инженерно-технического института за 2012. Тирасполь. -16-26 января 2013, С 34-37.

4. Agafii V.I.,Yurchenko E.V., Yurchenko V.I., Petrenko V.I., Dikusat A.I. Deposition of Al-Sn Nanostructuring Coatings on Aluminum Surface Using Electrosark Alloying and Their Wear Resistance under Friction in Oil. International conference on Nanotechnologies and Biomedical

Engineering German-Moldovan Worksnop on Novel Nanomaterials for Electronic, Photonic and Biomedical Applications Proceedings. Chisinau, Moldova April 18-20. 2013 p. 227-230

5. Юрченко Е.В., Дикусар А.И. Модифицирование поверхности алюминиевых деталей в условиях ЭИЛ электродами-инструментами из сплава Al-Sn и их механические свойства Международная объединенная конференция V конференция «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии», VI конференция «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей». Тезисы докладов. Плес Ивановская область. -16-20 сентября 2013. С.66.

6. Юрченко Е.В. Определение износостойкости покрытий на алюминиевых сплавах при испытании на трение по схеме «диск-колодка» Доклады итоговой научной конференции профессорско-преподавательского состава инженерно-технического института за 2013. Тирасполь. -15-17 января 2014, С 34-36.

7. E.V. Yurchenko. Changing the properties of the tool-electrodes under conditions of the electrosparc alloying of aluminum surfaces using Al-Sn alloy. 7th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics. Chisinau, Moldova. September 16-19, 2014. С 331.

Патенты:

1. Патент №457 Приднестровская Молдавская Республика (51) B23 H5/00 Способ пайки алюминиевых изделий Е.В.Юрченко, Е.В. Пучкова заявл. от 21.05.2014.
2. Патент №458 Приднестровская Молдавская Республика (51) B23 H, B 82 Y Способ легирования поверхности алюминиевого изделия Е.В.Юрченко, А.И. Дикусар заявл. от 08.07.2014.
3. Notarare № 8499 din 2016.09.15 Procedeu de obtinere materialului abraziv pe liant de aluminiu. Iurcenko Evgenii, Agafii Vasile, Dicusar Alexandr, Bortoi Tudor.

ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Нижеподписавшийся под личную ответственность, что материалы, представленные в докторской диссертации, являются результатом личных научных исследований и разработок.

Осознаю, что в противном случае буду нести ответственность в соответствии с действующим законодательством.

Юрченко Евгений _____

Дата _____

CURRICULUM VITAE

Numele de familie și prenumele Iurcenco Evghenii

Data și locul nașterii 13.06.1963, or. Iurga,
regiunea Kemerovo, RSFSR

Cetățenia Rusia

Studii: Institutul de Ingineri al Flotei Maritime
din Odesa în anii 1981-1986, Odesa,
Ucraina

Activitatea profesională:

inginer-tehnolog în domeniul detectării defectelor
corpurilor navei
Uzina de reparații navale din Riga, or. Riga, Letonia
1986-1990
inginer-proiectant
”Uzina de producere a mașinilor de turnat ”S.M. Kirov” din
Tiraspol”, or. Tiraspol, Moldova
1990-1991
inginer-programator
”Uzina de producere a mașinilor de turnat ”S.M. Kirov” din
Tiraspol”, or. Tiraspol, Moldova
1991-1993
inginer-programator
”Uzina de refrigeratoare auto din Tiraspol”, or. Tiraspol,
Moldova
1993-1998
inginer-programator la ÎS ”Santehmontaj”
or. Tiraspol, Moldova
1998-2011
Lector superior al catedrei ” Știința despre mașini și utilaj
tehnologic”, Universitatea de Stat din Transnistria ”Taras Șevcenko”
Institutul tehnico-ingineresc din anul 2011 și pînă în prezent

Participări în proiecte științifice naționale și internaționale

Nr. 11.817.05.05A ”Metode electro-fizico-chimice de obținere și prelucrare a materialelor și acoperirilor noi cu caracteristici funcționale avansate” (anii 2011-2014),

Nr. 15.817.02.05.A ”Metode fizico-chimice și aspectele ingineresti ale obținerii materialelor și suprafețelor noi pentru tehnologiile de multiscară.”

Programul european IRSES (Proiect Oil@Sugar, GA nr. 295202).

Participări la foruri științifice (naționale și internaționale):

2010. III Международная научно-техническая конференция «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей» г.Кострома

2013. International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering German-Moldovan Worksnop on Novel Nanomaterials for Electronic, Photonic and Biomedical Applications Proceedings Chisinau, Moldova;

2013 Международная объединенная конференция :

IV конференция "Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей"

V конференция "Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии". г. Плес, Россия;

2013. BALTRIB 2013. VII International Scientific Conference Lithuanian University of Agriculture, Akademija, Kaunas.

2013. IX Международная научно-практическая конференции «Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин». Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Российской академии сельскохозяйственных наук г. Москва.

2014. Международная научно-техническая конференция «Программа модернизации инженерно-технологического обслуживания АПК как основа промышленной и образовательной политики». Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Российской академии сельскохозяйственных наук г. Москва.

2014. International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics (MSCMP 2014). Chisinau, Moldova.

2015. 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering (ICNBME-2015), Chisinau, Republic of Moldova

2015 Международный научно-практический симпозиум «Достижения и перспективы в агроинженерии и автотранспорте» Государственный аграрный университет Молдовы г.Кишинев.

Lucrări științifice și științifico-metodice publicate:

10 articole, 7 materiale ale comunicărilor științifice, 2 brevete.

Cunoașterea limbilor: Rusa (materna),
Romana (slab),
Engleza (slab).

Date de contact :

Adresa de serviciu or.Tiraspol
Telefon de serviciu (323) 777 29256
email e.iurcenko@mail.ru

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю работы д.х.н., члену-корреспонденту АН Республики Молдовы, профессору А.И. Дикусару, а также коллективам лабораторий «Электрохимические производства», «Технологическое оборудование», «Комплексные технологии» Приднестровского государственного университета им. Т.Г.Шевченко и лаборатории «Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов им. Б.Р.Лазаренко» Института прикладной физики АН Республики Молдовы, за оказанные помощь и поддержку при выполнении настоящей работы.

Приложения

Приложение 1

Таблица 1

Зависимость свойств покрытий от скорости движения электрода.

V м/с	Ra исх мкм	Изменение веса мг	Ra пр мкм	ΔU пр мг	f прсред	ΔU 0 мг	$\Delta U_{\text{кт}}$ 0 мг	f 0сред	Ra мкм	$U = \Delta U_{\text{кт}} / \Delta U_0$
0,3	22,0±1,4	32	11,0±1,0	10,75	0,06	16,55	8,60	0,06	11,8±1,1	0,52
	17,2±0,5	23	11,8±0,8	4,40	0,07	1,70	1,20	0,08	12,5±0,7	0,71
0,6	14,4±0,5	15	9,2±0,7	3,75	0,11	24,00	2,10	0,10	8,90±0,5	0,88
	11,8±1,5	13	7,7±0,5	0,10	0,16	11,00	2,60	0,15	7,8±0,6	2,4
1,0	8,9±0,5	10	5,5±0,2	0,35	0,12	0,65	0,70	0,12	5,5±0,2	1,10
	12,3±0,5	0	8,0±0,3	1,45	0,11	1,30	5,60	0,14	7,1±0,2	4,30
1,5	11,5±0,5	-4	7,5±0,5	0,20	0,19	0,35	0,90	0,12	6,7±0,6	2,60
	10,7±0,5	-2	9,1±0,5	0,20	0,19	2,15	4,60	0,16	10,20±0,5	2,10
2,0	11,9±0,5	-1	8,1±0,4	0,25	0,15	0,35	1,25	0,09	7,3±0,3	3,40
	9,1±0,5	-5	6,8±0,4	0,10	0,14	0,9	0,70	0,13	6,0±0,4	0,80

Где:

Ra исх ; Ra пр; Ra - - шероховатость: исходного покрытия, после притирки , после основного этапа испытаний.

$\Delta m_{\text{пр}}$; $\Delta m_{\text{кт}}$; Δm_0 – изменение массы: образца при притирке, контртела и образца при основном этапе испытаний.

f пр , f_0 – коэффициент трения: в процессе притирки; при основном этапе испытаний.

Таблица 2.

Результаты экспериментов по определению износостойкости покрытий на сплаве Д1

№ образца п/п	Тип поверхности	Исходная шероховатость покрытия перед испытанием $R_a^{исх}$, мкм	Притирка			Испытание				Режимы работы установки
			Шероховатость покрытия после притирки $R_a^{пр}$, мкм	Износ в время притирки $\Delta U^{пр}$ мг	Коэффициент трения в процессе притирки f	Шероховатость покрытия после испытания $R_a^{кон}$, мкм	Износ покрытия за время испытания, ΔU^0 , мг	Износ контртела за время испытания, $\Delta U^{кт}$, мг	Коэффициент трения во время испытания F_0	
1	Д1	0,72±0,08	0,32±0,21	69,40	0,13	-	67,9	0,40	0,19	4
2	Д1	0,52±0,25	0,17±0,08	28,3	0,11	-	86,3	4,30	0,20	4
3	Al-Sn	13,1±2,4	6,5±0,9	3,40	0,11÷0,15	5,9±1,0	8,7	9,35	0,12	4
4	Al-Sn	14,21±2,6	7,5±2,0	2,00	0,11÷0,17	7,8±1,3	0,6	5,95	0,22	4
5	Al-Sn	13,1±1,2	7,6±1,6	3,90	0,11	7,8±1,0	1,2	5,95	0,11	4
6	Al-Sn	10,7±1,6	8,5±1,3	0,25	0,08	8,8±1,0	0,35	6,70	0,08	4
7	Al-Sn	18,9±2,4	10,9±1,5	3,00	0,18	7,5±1,5	6,05	37,15	0,15	4
8	Al-Sn	15,1±3,4	8,6±1,0	2,45	0,13	5,8±1,1	5,1	32,0	0,14	4
14	Al-Sn	19,4±1,5	15,2±2,8	2,0	0,12÷0,22	-	-	-	-	6
15	Al-Sn	17,9±1,5	12,9±2,2	1,4	0,22	12,1±2,0	2,7	50,8	0,22	6

Таблица 3.

Зависимость износа контртела от шероховатости поверхности покрытия после притирки (Параметры нанесения покрытия на образец :
Режим 6, амплитуда вибровозбудителя 0,5, коэффициент энергии 0,6, время обработки 4 мин.)

№ п/п	Шероховатость покрытия после притирки $Ra^{пр}$, мкм	Износ контртела в процессе испытаний, $\Delta U^{кт}$, мг	Износ покрытия в процессе испытаний ΔU^0 , мг	Режим работы установки ALIER- 31	Суммарный износ покрытия за время притирки и испытаний $\Delta U^0 + \Delta U^{пр}$, мг
1	6,5±0,9	9,35	8,7	4	12,1
2	7,5±2,0	5,95	0,6	4	2,6
5	7,6±1,6	5,95	1,2	4	5,1
6	8,5±1,3	6,7	0,35	4	0,7
7	10,9±1,5	37,15	6,05	4	9,1
8	8,6±1,0	32,0	5,1	4	7,6
15	12.9±2,2	50,8	2,7	6	5,1

Таблица 4.

Микротвёрдость образцов, прошедших электроискровое легирование до испытания на износ. Электрод Al-Sn. Материал образца Д1 . (Покрытие наносилось за 4 раза по длине последовательно по 1мин. каждая часть с перерывом для охлаждения электрода. Образец был разделён на 4 части)

№ обр.	Место замера	№ замера по длине	HV100 кг/мм ²	Поле
18	Основа	На фланцах	87-91	светлое
	Покрытие 1 части	1	91,6	серое
		2	84	серое
		3	71	серое
		4	55	серое
	2 части	1	68	серое
		2	59	серое
		3	45	серое
		4	57	серое
	3 части	1	66	серое
		2	47	серое
		3	68	серое
		4	68	серое
	4 части	1	47	серое
		2	61	серое
		3	67	серое
		4	74	серое

Таблица 5.

Микротвёрдость образцов с покрытием после проведения испытаний на износ.

№	Место замера	№ замера по длине	HV кг/мм ²	Поле
9	Основа	на фланцах без покрытия	91-105	светлое
	покрытие	1	87	светлое
		2	87	светлое
		3	110	тёмное
		4	110	тёмное
		5	87	светлое
		6	110	тёмное
		7	74	светлое
		8	81	серое
10	основа	на фланцах	100-102	светлое
	покрытие	1	91	тёмное
		2	71	светлое
		3	59	серое
		4	91	тёмное
		5	150	тёмное
		6	91	тёмное
		7	74	тёмное
		8	121	тёмное
		9	55	светлое
		10	57	светлое

Таблица.6

Результаты износных испытаний образцов алюминиевого сплава Д1, обработанного по режиму II обрабатывающим электродом из сплава АО20-1 при скорости перемещения

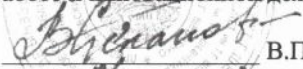
$$V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

№	Изменение веса обр. после электроискрового легирования, мг	$Ra^{исх.}$, мкм	Время испытаний, час	Ra , мкм	Износ образца $\Delta U^{обр.}$, мг	Износ контртела $\Delta U^{кт}$, мг	$U = \Delta U^{кт} / \Delta U^{обр.}$
1	-10	7,9±0,7	1	7,4±0,8	0,05	0,85	17,00
			2		0,00	0,40	25,00
			3	7,3±0,6	0,00	0,15	28,00
			4		0,10	0,05	9,70
			5	7,5±0,6	0,10	0,05	5,00
				Σ	0,25	1,50	$U_{cp}=16,94$
2	-3	7,2±0,7	1	6,1±1,0	0,10	0,70	7,00
			2		0,10	0,15	1,50
			3	5,9±0,8	0,15	0,30	2,00
			4		0,10	0,10	1,00
			5	6,0±1,0	0,15	0,10	13,50
				Σ	0,10	1,35	$U_{cp}= 5,00$

Приложение 2

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ПГУ им. Т.Г. Шевченко
по научной работе и инновационной деятельности

профессор  В.П. Степанов

«04» «07» 2014 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс материалов
диссертационной работы Юрченко Евгения Владимировича
по теме: «Получение упрочняющих наноструктурированных электроискровых покрытий на
алюминиевых сплавах и их использование при восстановлении и ремонте деталей машин
АПК.»

Настоящий акт составлен в том, что в Инженерно-техническом институте Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко на кафедре «Автоматизированные технологии и промышленные комплексы» в рамках выполнения соискателем Юрченко Е.В. диссертационной работы на тему «Получение упрочняющих наноструктурированных электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах и их использование при восстановлении и ремонте деталей машин АПК.», был разработан метод получения износостойких покрытий на алюминиевых сплавах, который включает выбор состава алюминиевых электродов для электроискрового легирования, определение оптимальных режимов электроискровой обработки и выбор способа нанесения покрытий на алюминиевые детали.

Лабораторные работы по дисциплине «Электроискровое легирование»: «Влияние режимов электроискровой обработки на получение износостойкого покрытия на алюминиевых деталях» и «Определение температурных параметров процесса электроискрового легирования при нанесении износостойкого покрытия на алюминиевые сплавы» вошли в рабочую программу дисциплины.

Директор ИТИ, к.т.н., доцент

Заведующий кафедрой «АТиПК»,
к.т.н., доцент

 Ф.Ю. Бурменко

 В.Г. Звонкий

Приложение 3

«УТВЕРЖДАЮ»



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ПГУ им. Т.Г.Шевченко
по научной работе
и инновационной деятельности
профессор *В.П. Степанов* В.П. Степанов
2014 г.

АКТ

Настоящий акт составлен в том, что Приднестровским государственным университетом им. Т.Г. Шевченко (г. Тирасполь) передан ООО ПКП «Современные технологии» отчёт о результатах работы, выполненной в НИЛ «Технологическое оборудование» в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве от 12.12.2013 г. № 214 на тему «Получение упрочняющих наноструктурированных электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах и их использование при восстановлении и ремонте деталей машин АПК».

Результаты данной работы показали, что предлагаемая методика нанесения покрытий на алюминиевые сплавы с помощью электроискрового легирования электродами из сплава Al-Sn позволяет получать многослойные покрытия повышенной толщины с высокой износостойкостью.

Метод может быть применён при ремонте посадочных мест под подшипники щитов автомобильных электрогенераторов и корпусов водяных насосов, а так же для восстановления автомобильных радиаторов с алюминиевыми трубками и другой номенклатуры. Предлагаемая методика позволяет восстанавливать посадочные места под подшипники на деталях из алюминиевых сплавов по следующей технологии:

- первый слой покрытия наносится на изношенную поверхность электродом из сплава АО20-1 при режиме с энергией импульса искрового разряда 0,03 - 0,07 Дж;
- последующие слои наносятся при энергии импульса 0,9 - 1,1 Дж.

Метод ремонта автомобильных алюминиевых радиаторов, заключается в том, что на дефектное место наносится покрытие из сплава АО20-1, а затем производится пайка оловянно-свинцовым сплавом ПОС-40. Применение такой технологии ремонта алюминиевых радиаторов позволяет получить покрытие, выдерживающее давление 2,5 кг/см² при том, что рабочее давление составляет 0,9 кг/см².

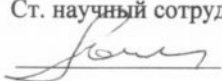
Результаты данного исследования используются ООО ПКП «Современные технологии» для ремонта автомобильных радиаторов путём электроискрового легирования с последующей

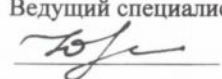
пайкой, а так же для ремонта корпусных деталей из алюминиевых сплавов с износом поверхности 0,1 - 0,5 мм на сторону.



От ПГУ им. Т.Г.Шевченко
Зав. НИЛ «Технологическое оборудование»

К.т.н., доцент
 Бурменко Ф.Ю.

Ст. научный сотрудник НИЛ
 Юров Л.Л.

Ведущий специалист НИЛ
 Юрченко Е.В.

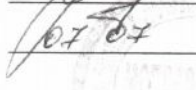
Приложение 4

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

предприятия ДООО «Молдавизолит РиО»

 Аритонов А.М.

 2014 г.

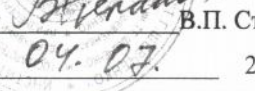
«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ПГУ им. Т.Г.Шевченко

по научной работе

и инновационной деятельности

профессор  В.П. Степанов

 04.07. 2014 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы ведущего специалиста НИЛ «Технологическое оборудование» ПГУ им. Т.Г.Шевченко, Юрченко Е.В.

«Получение упрочняющих наноструктурированных электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах и их использование при восстановлении и ремонте деталей машин АПК».

В соответствии с договором о научно техническом сотрудничестве между Приднестровским государственным университетом им. Т.Г. Шевченко (г.Тирасполь) и предприятием ДООО «Молдавизолит РиО» от 02/04/2014 г. № 362 предприятию переданы результаты исследования, проведенные с участием Е.В. Юрченко, включающими технологические рекомендации по проведению ремонта и восстановления алюминиевых деталей с помощью нанесения износостойких покрытий электроискровым легированием.

Рекомендуется восстановление изношенных деталей производить по следующей технологии :

- очистка изношенных поверхностей от загрязнения;
- дефектация и оценка величины износа;
- нанесение покрытия по следующему режиму: получение покрытия электродом из сплава АО20-1 с энергией импульса $0,03 \div 0,07$ Дж с последующим нанесением упрочняющего слоев покрытия при энергии импульса $0,9 \div 1,1$ Дж. Количество слоёв определяется необходимой толщиной покрытия.

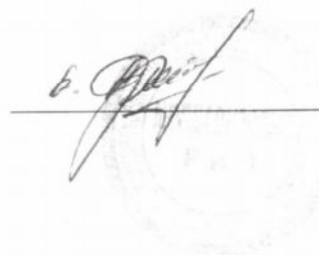
По данной технологии произведен ремонт посадочных мест под подшипники водяных помп автомобилей «Газель» в количестве 3 шт., а так же подшипниковых щитов автомобильных генераторов в количестве 6 шт.

При эксплуатации восстановленных деталей с 16/04/2014 по настоящее время претензий от заказчика нет.

Данная технология принята к внедрению на ДООО «Молдавизолит РиО»

От предприятия ДООО «Молдавизолит РиО»

От ПГУ им. Т.Г.Шевченко

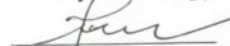


Зав. НИЛ «Технологическое оборудование»

К.т.н., доцент

 Бурменко Ф.Ю.

Ст. научный сотрудник НИЛ

 Юров Л.Л.

Ведущий специалист НИЛ

 Юрченко Е.В.

Приложение 5

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

предприятия «Торговый проект»

Поезжаев С.А.

2014 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ПГУ им. Т.Г.Шевченко

по научной работе

и инновационной деятельности

профессор

В.П. Степанов

04.07.14г.

2014 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы ведущего специалиста НИЛ «Технологическое оборудование» ПГУ им. Т.Г.Шевченко, Юрченко Е.В.

«Получение упрочняющих наноструктурированных электроискровых покрытий на алюминиевых сплавах и их использование при восстановлении и ремонте деталей машин АПК».

В соответствии с договором о научно техническом сотрудничестве между Приднестровским государственным университетом им. Т.Г. Шевченко (г. Тирасполь) и предприятием «Торговый проект» от 21.03.2013 г. № 122/06 предприятию переданы результаты исследования, проведенные с участием Е.В. Юрченко, включающими технологические рекомендации по получению износостойких покрытий на алюминиевых и стальных деталях с помощью электроискрового легирования.

Рекомендуется после очистки детали наносить покрытие электроискровым легированием с помощью электродов из сплава АО20-1. Первый слой покрытия наносится на «мягких режимах» с энергией импульса 0,03-0,07 Дж, а последующие слои с энергией импульса 1,6 – 2,0 Дж. Количество слоёв определяется необходимой толщиной покрытия. По данной технологии произведен ремонт подшипниковых щитов электродвигателя и валов мешалки тестомесильного аппарата. Указанные детали эксплуатируются с мая месяца 2013 г. по настоящее время. Замечаний или претензий к работе восстановленных деталей нет.

От предприятия «Торговый проект»

Гл. инженер

Ратушный А.В.

От ПГУ им. Т.Г.Шевченко

Зав. НИЛ «Технологическое оборудование»

К.т.н., доцент

Бурменко Ф.Ю.

Ст. научный сотрудник НИЛ

Юров Л.Л.

Ведущий специалист НИЛ

Юрченко Е.В.

Министерул жустиций
ал Републичий Молдовенешть
Нистрене



Міністерство юстиції
Придністровської Молдавської
Республіки

Министерство юстиции
Приднестровской Молдавской
Республики

БРЕВЕТ ПАТЕНТ
ПАТЕНТ № 458

Настоящий патент на изобретение
Способ легирования поверхности алюминиевого изделия

Патентообладатель(и): **Юрченко Евгений Владимирович и
Дикусар Александр Иванович**

Автор(авторы): **они же**

Заявка № **14100511**

Приоритет **08.07.2014**

Зарегистрировано в Государственном реестре Министерства юстиции
Приднестровской Молдавской Республики **14.07.2014**

Действие патента распространяется на всю территорию
Приднестровской Молдавской Республики

сроком на 20 лет с 08 июля 2014 года



Государственный регистратор

Т.Н. Козачинская

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ № 458 F 1

(21) 14100511

(51) В 23 Н, В 82 Y

(22) 08.07.2014

(46) Вестник Приднестровского университета, 2014

(76) **Юрченко Евгений Владимирович**,
г. Тирасполь, ул. Одесская, д. 88/4, кв. 39 и
Дикусар Александр Иванович,
г. Тирасполь, ул. Зелинского, д. 1 а, кв. 35

(56) Патент РФ № 2430814, В 23 Н 9/00, 2011

(54) **Способ легирования поверхности алюминиевого изделия**

Государственный регистратор *Т.Н. Козачинская*



(57) Изобретение относится к области технологических процессов, в частности к способам обработки металлов воздействием электрического тока с использованием электрода, который является инструментом, а также способам получения наноструктур и может применяться для восстановления и упрочнения поверхностей изделий из алюминиевых сплавов.

Способ легирования поверхности алюминиевого изделия включает получение слоя покрытия путем электроискровой обработки. При контакте электрода с легируемой поверхностью на ней формируют слой, содержащий ультрадисперсные частицы (нанонити) соединений олова. Для этого используют электрод, состоящий из $60 \div 80$ % алюминия и $40 \div 20$ % олова.

Использование предлагаемого технического решения позволяет восстановить изношенную поверхность изделия, повысить ее твердость и износостойкость за счет формирования наноструктур.

1 с. п. ф-лы

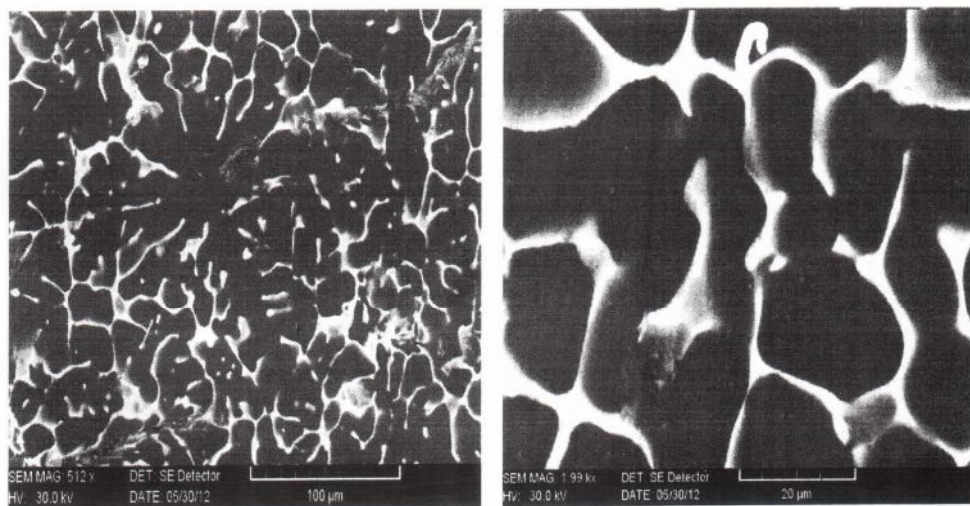
Изобретение относится к области технологических процессов, в частности к способам обработки металлов воздействием электрического тока с использованием электрода, который является инструментом, а также способам получения наноструктур и может применяться для восстановления и упрочнения поверхностей изделий из алюминиевых сплавов.

Цель изобретения – восстановление и повышение износостойкости покрытия за счет формирования его структуры.

Указанная цель достигается тем, что при контакте электрода с легируемой поверхностью на ней формируют слой, содержащий ультрадисперсные частицы (нанонити) соединений олова, при этом используют электрод состоящий из $60 \div 80$ % алюминия и $40 \div 20$ % олова.

Исследования показали, что при содержании в электроде легкоплавкого компонента (Sn) менее 20% на поверхности изделия образуется слишком тонкий слой покрытия. При содержании легкоплавкого компонента более 40% сплав получается очень хрупким и при нанесении его электроды могут ломаться. Хрупкость объясняется тем, что в теле электрода получаются толстые межзеренные прослойки олова, которые при нагревании ослабляют связи между зернами.

Техническое решение поясняется иллюстрацией (микрофотографией), где на темном фоне зерен алюминия показана светлая сетка олова.



Микрофотографии структуры электрода из сплава Al-Sn при различном увеличении.

Металлографический анализ показал, что олово в алюминиево-оловянном сплаве располагается в виде прослоек $1 \div 5$ мкм между зернами алюминия.

При нагревании во время процесса электроискрового легирования прослойки олова расплавляются, окисляются и под воздействием электромагнитных (пондеромоторных) сил в виде микродисперсных частиц и нанонитей попадают на катод и оседают на нем образуя диффузионное соединение.

Преимуществами предлагаемого решения являются:

- возможность получения износостойкого слоя с толщиной, достаточной для восстановления размера детали;
- получение покрытия с наличием в его структуре окислов SnO_2 в форме нановолокон, которые придают покрытию сверхвысокую твердость и износостойкость;
- относительная дешевизна и простота получения электродов-инструментов.

Пример применения технического решения.

Электроды из алюминиево-оловянного сплава получают путем плавки в индукционной печи. Расплав разливают в кокиль для получения электродов диаметром 4÷8 мм. Поверхность изделия покрывают с помощью установки электроискрового легирования, например «Alier 31», при следующих параметрах работы: режим 5; амплитуда 0,5; коэффициент энергии 0,8; скорость нанесения 1 мм / сек., энергия импульса 0,8÷1,1 Дж.

В результате получают покрытие с вкраплениями в виде микродисперсных частиц и нанонитей из окислов олова.

Износостойкость измеряют при возвратно-поступательном движении контртела по покрытию в вазелиновом масле. Контртело представляет собой пластину из закаленной до 650 кг/мм² стали 45. Результаты сравнительных испытаний образцов с покрытием и без, приведены в таблице.

Таблица

Результаты износных испытаний при наличии смазки

	Δm_o Износ образца с покрытием за время испытания $\times 10^{-3}$ г.	$\Delta m_{кт}$ Износ контртела за время испытания $\times 10^{-3}$ г.	Коэффициент износа $K = \frac{\Delta m_o}{\Delta m_{кт}}$
Без покрытия ЭИЛ			
1	67,90	0,40	169,00
2	86,30	4,30	20,00
С покрытием ЭИЛ электродами из алюминиево-оловянного сплава			
3	6,05	37,15	0,163
4	5,1	32,00	0,159

Данные, приведенные в таблице, подтверждают, что износостойкость покрытия в 7–9 раз превышает износостойкость закаленной стали.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ легирования поверхности алюминиевого изделия, включающий получение слоя покрытия путем электроискровой обработки, *отличающийся* тем, что, с целью восстановления и повышения износостойкости поверхности за счет структуры покрытия, при контакте электрода с легируемой поверхностью на ней формируют слой, содержащий ультрадисперсные частицы (нанонити) соединений олова, при этом используют электрод, состоящий из $60 \div 80$ % алюминия и $40 \div 20$ % олова.

Составитель О.Ф. Оноприенко

Министерул жустиций
ал Републик Молдовенешть
Нистрене



Міністерство юстиції
Придністровської Молдавської
Республіки

Министерство юстиции
Приднестровской Молдавской
Республики

БРЕВЕТ ПАТЕНТ
ПАТЕНТ № 457

Настоящее свидетельство на изобретение
«Способ пайки алюминиевых изделий»

Патентообладатель(и): **Юрченко Евгений Владимирович и Пучкова
Екатерина Викторовна**

Автор(авторы): они же

Заявка № 14100509

Приоритет 21.05.2014

Зарегистрировано в Государственном реестре Министерства юстиции
Приднестровской Молдавской Республики **28.05.2014**

Действие патента распространяется на всю территорию
Приднестровской Молдавской Республики

сроком на 20 лет с 21.05.2014



Государственный регистратор

О.Ф. Оноприенко

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ № 457 F1

(21) 14100509

(51) В 23 Н 5/00

(22) 21.05.2014

(46) Вестник Приднестровского университета, 2014

(76) **Евгений Владимирович Юрченко,**

3300 г. Тирасполь, ул. Одесская, д. 88/4, кв. 39, и

Екатерина Викторовна Пучкова,

3300 г. Тирасполь, ул. 9 Января, д. 61, кв. 26

(56) Никитский А.М. Пайка алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1983. – 192 с. С. 4–8, 93–104.

(54) **Способ пайки алюминиевых изделий**

На 2 листах

Государственный регистратор  О.Ф. Оноприенко

«28» мая 2014 года

(57) Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано при комбинированной обработке материалов, в частности, ремонте радиаторов охлаждения автотракторной техники.

Способ пайки алюминиевых изделий, включает подготовку поверхности под пайку и последующую пайку легкоплавким припоем, при этом предварительную подготовку поверхности проводят путём нанесения покрытия электроэрозионным способом электродом из легкоплавкого припоя.

1 с.п. ф-лы

Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано при комбинированной обработке материалов, в частности, ремонте радиаторов охлаждения автотракторной техники.

Целью настоящего изобретения является снижение трудоёмкости и повышение надёжности способа устранения течи алюминиевых изделий, в частности алюминиевых трубок радиатора.

Указанная цель достигается путём пайки повреждённых мест в трубках радиаторов легкоплавким припоем с предварительным нанесением на место пайки покрытия из легкоплавкого припоя электроэрозионным способом с помощью электроискрового легирования.

Способ осуществляют следующим образом: определяют место течи путём погружения радиатора в воду и подачи в него сжатого воздуха под необходимым давлением. Место течи определяют по выходу пузырьков воздуха из повреждённой трубки. Затем рядом с дефектом удаляют рёбра, мешающие пайке. На место, подлежащее пайке (например, трещина и место вокруг неё) электроэрозионным способом наносят покрытие электродом – инструментом, имеющим состав припоя, которым впоследствии будет производиться пайка. Покрытие наносят в несколько слоёв, пока не закроются дефектные места, после чего производят лужение путём

разравнивания покрытия нагретым паяльником. После лужения для упрочнения паяных мест паяльником наносится слой припоя того же самого или припоя, имеющего более высокие механические свойства (например, 70% Sn, 20% Pb, 10% Zn). В некоторых случаях возможно упрочнение паяного покрытия электроэрозионным способом электродами разного состава.

Пример осуществления способа.

Требуется устранить течь в трубке радиатора путём пайки трещины длиной 25 мм и раскрытием 0,3 мм. Для этого выбирают следующий режим работы установки для электроискрового легирования: энергия импульса 3 Дж, частота 700 Гц, скорость нанесения – 3 мм/с; вращающийся электрод диаметром 8 мм из оловянно-свинцового сплава ПОССу40–0,5.

Сначала наносят покрытие по всей площади пайки с перекрытием вокруг трещины на 5 – 8 мм, а затем 2–3 слоя непосредственно на трещину до полного её закрытия, после этого производят лужение путём разравнивания покрытия и пайку с нанесением слоя припоя толщиной 0,5–1,0 мм. После охлаждения производят проверку на герметичность под давлением воздуха 0,9–1,0 кг/см².

Указанный выше способ позволяет за счёт уменьшения количества операций снизить трудоёмкость по сравнению с аналогом в два-три раза и повысить надёжность устранения течи в радиаторе.

Формула изобретения

Способ пайки алюминиевых изделий, включающий подготовку поверхности под пайку и последующую пайку легкоплавким припоем, *отличающийся* тем, что с целью снижения трудоёмкости и повышения надёжности предварительную подготовку поверхности проводят путём нанесения покрытия электроэрозионным способом электродом из легкоплавкого припоя.

Составитель Т.Н. Козачинская