

На правах рукописи



Загуляев Дмитрий Валерьевич

**МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЯ И
ДОЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННО-
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И МАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора
технических наук

Новокузнецк – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Научные консультанты:	Громов Виктор Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Белов Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ «МИСИС»), профессор кафедры обработки металлов давлением
	Курзина Ирина Александровна, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), профессор кафедры природных соединений, фармацевтической и медицинской химии
	Иванов Константин Вениаминович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирское отделение Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), ведущий научный сотрудник
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»

Защита состоится «13» сентября 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Кемеровская область - Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42.

Факс (3843) 46-57-92,

E-mail: d212_252_04@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», <https://www.sibsiu.ru/dis/index.php?show=disert&id=140>

Автореферат разослан «20» июня 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.х.н., профессор



Горюшкин В.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Алюминий является самым распространённым из металлов и занимает первое место по содержанию в земной коре, на 1 тонну земной коры приходится 81,3 кг алюминия, что на 31,3 кг больше, чем железа. Ввиду его распространенности он вызывает повышенный интерес у научной общественности в направлении изучения его свойств и возможностей их модифицирования. Одним из распространенных методов модификации алюминия является добавление легирующих элементов, например, кремния, в процессе литья.

AlSi сплавы в настоящее время, вследствие низкой стоимости, высоких литейных свойств, коррозионной стойкости, небольшого коэффициента термического расширения нашли широкое применение при производстве самых разных деталей, начиная от компонентов бытовой техники и заканчивая узлами, применяемыми в авто- и самолетостроении. В частности, поршни двигателей внутреннего сгорания и компрессоров изготавливают преимущественно из доэвтектических и эвтектических AlSi сплавов. Однако, в связи со структурными особенностями литых AlSi сплавов, их прочностные свойства характеризуются невысокими значениями. Без специальной обработки расплава в готовых отливках, частицы кремния в эвтектике алюминиево-кремниевых сплавов имеют грубую пластинчатую форму, что значительно снижает механические свойства сплава. Механические свойства сплава также снижает избыточная концентрация легирующих элементов (Cu, Mg, Ni) и примеси (Fe), присутствие которых приводит к образованию интерметаллидов. В данной связи, для расширения сфер применения AlSi сплавов и повышения надежности деталей, изготавливаемых из них, возникает необходимость в модифицировании, направленном на улучшение функциональных характеристик AlSi сплавов.

Улучшение служебных характеристик деталей может быть достигнуто при обработке поверхности внешними энергетическими источниками, к которым относятся плазменное напыление, лазерная и ионная обработки и др. Данные виды обработок позволяют осуществить модифицирование локально, то есть в тех местах, где непосредственно происходит разрушение в процессе эксплуатации изделия.

Применение данных методов поверхностной обработки в различных отраслях промышленности, например, в космической или авиационной, неуклонно возрастает и становится сопоставимо с традиционными методами нанесения покрытий. В качестве перспективных методов внешних энергетических воздействий, оказывающих существенное влияние на структуру, фазовый состав, физические и механические свойства металлов и сплавов стоит отметить:

- 1) обработка многофазной плазменной струей;
- 2) воздействие интенсивного импульсного электронного пучка;
- 3) обработка магнитными полями величиной до 0,3 Тл;

4) комбинирование нескольких методов внешнего энергетического воздействия.

Таким образом, исследование влияния концентрированных потоков энергии на структурно-фазовые состояния и свойства Al и AlSi сплавов является актуальной научно-практической задачей.

Степень разработанности темы

Упрочнение поверхностных слоев металлических материалов с применением плазменных потоков и струй, электронных и ионных пучков, лазерного излучения, высокодозной ионной имплантации и электронно-лучевой наплавки в настоящее время сложилось в самостоятельную область научных исследований и практических разработок. Каждый из методов такой обработки материалов, имеет свою область применения и используется для решения определенного круга практических задач.

В настоящее время обработка материалов плазменными струями очень интенсивно развивается. За последнее десятилетие достигнуты определенные научные достижения. Важной особенностью сформированных с помощью электрического взрыва покрытий является то, что в плазменную струю, служащую инструментом воздействия на поверхность, могут быть внесены порошковые навески различных веществ, что значительно расширяет набор возможных упрочняющих фаз. В настоящее время известно несколько видов плазменного модифицирования поверхности, а именно: однокомпонентные – науглероживание, алитирование, никелирование, меднение; двухкомпонентные с использованием порошковых навесок – карбоборирование, бороалитирование, боромеднение, науглероживание совместно с диборидом титана, карбидом бора и оксидом циркония, которые однозначно приводят к увеличению эксплуатационных свойств изделий за счет формирования на поверхности пленки, характеризующейся повышенными физическими и механическими характеристиками. Существенных успехов по модифицированию структуры и свойств металлических материалов с помощью электрического взрыва проводников добились д.т.н. Д.А. Романов, д.т.н., Будовских Е.А.

Интенсивные импульсные электронные пучки наряду с плазменной обработкой являются широко используемым методом модифицирования свойств материалов, поскольку, оказывая прямое воздействие на поверхность, изменяют ее структуру и фазовый состав. Как следствие, увеличиваются износостойкость и твердость поверхностных слоев на величины не достижимые при стандартных методах модифицирования. В данном направлении работает несколько групп, в том числе международных. В Российской Федерации – это научные группы г.Томска (д.ф.-м.н. Панин А.В., д.ф.-м.н. Иванов К.В., д.ф.-м.н. Иванов Ю.Ф., д.ф.-м.н. Клопотов А.А.). В КНР – профессора Y. Fu, J. Kim, R. Wang.

Комбинирование нескольких методов обработки, в том числе плазменной с последующим облучением электронным пучком, так же

является перспективными методами упрочнения как черных, так и цветных металлических материалов и к настоящему времени установлены зависимости, подтверждающие данный факт. Исследования показали, что комбинированная обработка приводит к формированию однородной структуры субмикро- и наноразмерного масштабного диапазона, обеспечивающей кратное повышение функциональных свойств поверхности. Комбинированными воздействиями занимаются как в России, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья. С. Zhang, G. Chen – КНР, D. Utu – Германия, д.т.н., Каблов Е. Н. – Россия, д.т.н., Гордиенко А. И. – Белоруссия.

Цель работы - выявление физической природы и закономерностей формирования структурно-фазовых состояний, модификация свойств Al и доэвтектических силуминов, подвергнутых электронно-ионно-плазменным и магнитно-полевым воздействиям.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Исследовать влияние магнитных полей величиной до 0,3 Тл на микротвердость, скорость ползучести, дислокационную субструктуру, характеристики поверхности разрушения Al различной степени чистоты и установить физическую природу их изменения.

2. Установить влияние облучения интенсивным импульсным электронным пучком на микротвердость, параметр износа, коэффициент трения сплавов АК5М2 и АК10М2Н и определить механизмы эволюции структурно-фазовых состояний, элементного состава, параметров кристаллического строения указанных сплавов. Для сплава АК10М2Н рассмотреть перечисленные параметры после электровзрывного легирования.

3. Выявить изменения дюротметрических и трибологических характеристик сплавов АК5М2 и АК10М2Н, подвергнутых электронно-ионно-плазменной обработке, определить физическую природу упрочнения.

4. Разработать способ изменения деформационных характеристик Al за счет воздействия магнитными полями величиной до 0,3 Тл. Установить режимы электронно-ионно-плазменных воздействий, позволяющие значительно (в 2-2,5 раза) повысить трибологические свойства сплавов АК5М2 и АК10М2Н.

5. Внедрить экспериментальные результаты работы в практику модифицирования деталей и узлов, изготавливаемых из AlSi сплавов, научную деятельность и учебный процесс.

Научная новизна

В диссертационной работе сформирован банк данных и установлены закономерности, расширяющие представления о влиянии магнитных полей на деформационное поведение Al. Экспериментальные результаты, полученные в работе, и их анализ позволили определить механизмы, ответственные за изменение деформационного поведения Al с содержанием примесей Si от

0,0001 до 0,5900 масс.%, Fe от 0,0001 до 0,1470 масс.% при воздействии на него магнитными полями величиной до 0,3 Тл.

Впервые установлено, что электронно-ионно-плазменная обработка AlSi сплавов приводит к кардинальному преобразованию структуры поверхностного слоя материала, заключающемуся в формировании многоэлементного многофазного покрытия с субмикрористаллической структурой, свободного от кремниевых включений и интерметаллидов микронных и субмикронных размеров, характерных для исходного сплава.

Научная и практическая значимость работы

Результаты, представленные в диссертации:

1. Установленные закономерности и механизмы влияния внешних энергетических воздействий на формирование структурно-фазовых состояний, параметры тонкой структуры, физические и механические свойства позволили установить рациональные режимы обозначенных воздействий, что позволило внедрить указанные режимы обработок на российских предприятиях.

2. Развивают научные и научно-технические направления в области разработки новых технологических решений по повышению физических и механических свойств изделий из сплавов на основе алюминия для их дальнейшего применения в качестве конструкционных материалов, используемых в машиностроении, авиастроении, автомобилестроении;

3. Понимание физической природы упрочнения поверхности легких сплавов комбинированными внешними энергетическими воздействиями интересны специалистам в области физического материаловедения, физики конденсированного состояния, металловедения и термической обработки и полезны студентам и аспирантам соответствующих специальностей и направлений подготовки;

4. Расширяют теоретические основы влияния электронно-ионно-плазменных воздействий на структуру, физические и механические свойства легких сплавов и решают важную задачу машиностроения – повышение надежности и долговечности деталей и узлов ответственного назначения в условиях эксплуатации;

5. Основные положения работы представляют интерес как учебный материал в курсе лекций по физике конденсированного состояния, физического материаловедения, металловедения и термообработки, что подтверждается справками об использовании результатов работы в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и Самарском университете.

Тематика диссертационного исследования соответствует направлению стратегии научно-технологического развития Российской Федерации Н1 «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта» и относится к

приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ «Индустрия наносистем» и критической технологии «Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов». Работа проводилась в соответствии с государственным заданием № 3.1283.2017/ПЧ «Теоретическое и экспериментальное исследование и компьютерное моделирование структурно-фазовых превращений в сплавах при комбинированном энергетическом воздействии, протекающих на наноуровне, с целью создания новых материалов с уникальными физическими и физико-механическими свойствами» и грантом Российского научного фонда № 19-79-10059 «Закономерности эволюции структурно-фазового состояния доэвтектического силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком, при пластической деформации».

Полученные результаты соответствуют мировому уровню исследований, что подтверждается публикациями в журналах, входящих в первый квартиль международной системы цитирования Web of Science.

Методология и методы исследования

Объектами исследований являлись Al с содержанием примесей Si от 0,0001 до 0,5900 масс.%, Fe от 0,0001 до 0,1470 масс.% и алюминиево-кремниевые сплавы марок АК10М2Н и АК5М2 в связи с обширной сферой их использования и назревшей необходимостью модифицирования свойств. В качестве методов внешних энергетических воздействий, направленных на модифицирование структуры и свойств Al и сплавов на его основе использованы: воздействие магнитными полями, облучение интенсивным импульсным электронным пучком в различных режимах, ионно-плазменное нанесение покрытий системы Al-Y₂O₃ и электронно-ионно-плазменная обработка, сочетающая два вышеописанных метода.

В качестве методов определения прочностных, дюрометрических и трибологических свойств использованы измерения микротвердости, скорости ползучести, нанотвердости, коэффициента трения, износостойкости. Аналитические исследования структуры и фазового состава выполняли как классическими методами – оптическая микроскопия (металлография) и рентгеноструктурный анализ, так и современными методами исследования субмикро- и нанокристаллической структуры материалов, такими как атомно-силовая, сканирующая (в том числе картирование) и просвечивающая дифракционные электронные микроскопии, просвечивающая дифракционная электронная микроскопия в режиме сканирования (STEM), рентгеноспектральный микроанализ.

Статистическую обработку экспериментальных данных, их численный анализ и оценку значимостей осуществляли с использованием математических пакетов OriginPro и Microsoft Office Excel.

Достоверность результатов работы подкрепляется использованием современной приборной базы и зарекомендовавших себя в области физического материаловедения методик анализа структурно-фазовых

состояний и свойств материалов, существенным массивом полученных экспериментальным путем данных, достаточной статистикой измерения, корреляцией полученных результатов между собой и с экспериментальными данными полученными другими авторскими коллективами, а также использованием для анализа результатов теоретических представлений зарекомендовавших себя в физике твердого тела.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные зависимости уменьшения микротвердости алюминия с содержанием примесей Si от 0,0001 до 0,5900 масс.%, Fe от 0,0001 до 0,1470 масс.%, установленный немонотонный характер изменения скорости установившейся ползучести и закономерности изменения характеристик поверхности разрушения алюминия марки А85 при ползучести в магнитном поле 0,3 Тл.

2. Параметры воздействия интенсивного импульсного электронного пучка на сплавы АК5М2 и АК10М2Н, приводящие к многократному увеличению микротвердости, снижению параметра износа и коэффициента трения, за счет формирования поверхностного слоя толщиной до 100 мкм, свободного от включений второй фазы кремния, интерметаллидов и состоящего из нанокристаллической структуры ячеистой кристаллизации.

3. Структурно-фазовые превращения поверхностных слоев сплава АК10М2Н, происходящие при воздействии на его поверхность ионизированной плазмы и приводящие к существенным изменениям механических и трибологических свойств.

4. Результаты исследований влияния комплексной электронно-ионно-плазменной обработки, состоящей из последовательного электровзрывного легирования системой Al-Ti-Y₂O₃ и облучения интенсивным импульсным электронным пучком на структурно-фазовые состояния, дислокационную субструктуру, механические и трибологические свойства сплава АК10М2Н.

5. Новые технические решения, позволяющие: регулировать деформационное поведение алюминия за счет воздействия магнитными полями и существенно повысить эксплуатационные характеристики сплавов АК5М2 и АК10М2Н при работе в условиях трения скольжения.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является логическим завершением цикла исследований, проведенных автором в сотрудничестве с научными коллективами г. Новокузнецка, г. Самары, г. Томска, Вэньчжоу (Китай). Личный вклад Загуляева Д.В. состоит в формулировке цели, постановке задач, планировании исследований, выборе методов анализа, установлении зависимостей и закономерностей при обработке, анализе и обобщении полученных результатов, выявлении физической природы наблюдаемых зависимостей, составлении выводов и положений, выносимых на защиту.

Автор самостоятельно выбирал материалы для исследований, подбирал режимы обработки внешними энергетическими источниками, определял

рациональные параметры обработки, проводил обработку многофазными плазменными струями, электронными пучками, выполнял сбор и статистическую обработку полученных экспериментальных данных, анализировал изменения структуры и свойств AlSi сплавов, подвергнутых внешним энергетическим воздействиям, и сопоставлял их с литературными данными. Диссертант апробировал результаты работы на конференциях различного уровня, в открытой российской и зарубежной научной печати, а также защитил права на результаты интеллектуальной деятельности.

Апробация результатов работы

Результаты, изложенные в диссертационной работе, прошли апробацию на следующих научных конференциях, совещаниях и семинарах:

LXIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», посвященной 70-летию Тольяттинского государственного университета, 2021 г., Тольятти; Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», 2021 г., Томск; II Международной конференции «Физика конденсированных состояний», 2021 г., Черногоровка; Международная конференция «Физическая мезомеханика. T29 Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», посвященная 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика В. Е. Панина, 2020 г., Томск; 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online), 2020, Tomsk; Одиннадцатая Международная Конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов», памяти академика Г.В. Курдюмова, 2020 г., Черногоровка; Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», 2020 г., Курск; LXII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 2020 г., Витебск; International Workshop «Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems» 2019, Tomsk; VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» 2019 г., Москва; Международная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов» 2019 г., Екатеринбург; XLV Международная молодежная научная конференция "Гагаринские чтения" 2019 г., Москва; XV Международная школа-семинар «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах (ЭДС-2018)», 2018 г., Барнаул; 60 Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», 2018 г., Витебск; XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 100-летию ФТИ им. А. Ф. Иоффе и 110 со дня рождения чл.-кор. АН СССР А.В. Степанова, 2018 г., Санкт-Петербург; The 9th International Symposium on Materials in External Fields (ISMEF 2018), 2018; 14th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 2018, Tomsk;

XIV международный семинар «Структурные основы модифицирования материалов» 2017 г., Обнинск; Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», 2017 г., Витебск; XX Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество. Metallurgy - 2017», 2017 г., Новокузнецк; Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 2016 г., Томск; VI Международная молодежная научная конференция, 2016 г., Курск; VI International Scientific Practical Conference on Innovative Technologies and Economics in Engineering, 2015, Yurga; 11th International symposium of croatian metallurgical society «Materials and metallurgy» (SYMD-2014), 2014, Šibenik; VII Всероссийской научно-технической конференции «Физические свойства металлов и сплавов» 2013 г., Екатеринбург; XX Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные памяти профессора В.А. Лихачева, 2012 г. Санкт-Петербург; VI Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур», 2012 г., Москва.

Публикации по теме диссертации

Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 98 печатных работах в том числе: 2 монографии, в том числе 1 в международном издательстве Taylor & Francis Group: Home, Великобритания; 1 глава в монографии; 36 статей в научных реферируемых изданиях, индексируемых международными реферативными базами данных Scopus и Web of Science; 17 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ; 29 докладов и тезисов на конференциях различного уровня и других научных мероприятиях; 6 патентов на изобретение РФ и 7 свидетельств о государственной регистрации базы данных.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа по своему содержанию, поставленным целям и задачам, методикам исследования соответствует п.1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления» паспорта специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния (технические науки).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, приложений и списка литературы, включающего 290 наименований. Диссертация содержит 330 страниц, в том числе 174 рисунка и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведена степень разработанности изучаемого научного направления, сформулированы цель и основные задачи исследования, обозначены их новизна, научная и практическая значимость, кратко описаны методы исследования и личный вклад автора, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И СВОЙСТВ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ ВНЕШНИМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ», являющемся обзорным, проведен анализ отечественных и зарубежных научных источников, объектов интеллектуальной деятельности, отражающих современное состояние проблемы модификации структуры и свойств внешними источниками энергии. Рассмотрены такие виды воздействий как плазменное напыление, электронно-лучевая наплавка, лазерное излучение, высокоинтенсивные электронные и мощные ионные пучки, высокодозная ионная имплантация, магнитно-полевые воздействия, а также комбинирование различных методов внешнего энергетического воздействия. Описаны физические процессы, происходящие при каждом из воздействий и приводящие к изменениям структурно-фазовых состояний и свойств металлических материалов. На основе анализа литературных данных установлена актуальность и необходимость дальнейшего развития данного научного направления.

Во втором разделе «ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ» приводится обоснование необходимости выбора в качестве материалов для исследования Al и сплавов AlSi. В качестве основных причин выбора материалов для исследования указано следующее: 1) распространённость алюминия в земной коре; 2) уникальные свойства алюминия, а именно малая плотность, пластичность, легкость в отливке, устойчивость к коррозии, высокая электропроводность, не токсичность, легкость в переработке и др.; 3) широчайший спектр применения Al и сплавов на его основе и их огромное значение для мировой экономики.

Приводится химический состав исследованных сплавов, описываются форма и размеры образцов для исследований и их пробоподготовка. Рассматриваются методы и методики металлографического анализа, определения скорости ползучести, измерения микро- и нанотвердости, в частности метод Виккерса и склерометрии, трибологических свойств, а именно коэффициента износа и коэффициента трения. Рассмотрены методы анализа тонкой структуры, атомно-силовая, просвечивающая и сканирующая электронные микроскопии, методики приготовления фольг для анализа методами просвечивающей электронной микроскопии. Показаны марки и модели используемого для исследований оборудования.

Дается описание методологий электронно-ионно-плазменных воздействий. В частности, описывается метод формирования и обработки интенсивным импульсным электронным пучком исследуемых сплавов, приводится схема получения электронного пучка, ориентация образцов относительно потока электронов и режимы облучения. Представлена конструктивная схема и описаны процессы, происходящие внутри технологической камеры электровзрывной установки, используемой в работе для формирования многофазных ионно-плазменных покрытий. Рассмотрена технология комплексной электронно-ионно-плазменной обработки, состоящая из двух этапов. Первый этап заключался в нанесении композиционного покрытия системы $\text{Al-Ti-Y}_2\text{O}_3$ методом электрического взрыва с последующим облучением полученного покрытия интенсивным импульсным электронным пучком (второй этап модификации).

Для каждого из самостоятельных методов (электровзрывное легирование или облучение интенсивным импульсным электронным пучком) были определены по два оптимальных режима воздействия. Установленные, оптимальные режимы были использованы для комплексного модифицирования сплавов, т.е. всего использовалось четыре режима комплексного модифицирования. Дается описание установки по созданию магнитных полей разной величины, в том числе представлена схема *in-situ* исследования процесса ползучести.

В третьем разделе «ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ЧИСТОТЫ» представлены результаты исследования влияния магнитного поля величиной до 0,3 Тл на (1) микротвердость Al разной степени чистоты и (2) скорость стационарной ползучести. Выполнена фрактография поверхности разрушения Al, полученной при деформировании в режиме ползучести с одновременным воздействием магнитными полями разной величины, а также проведен анализ изменений дислокационной субструктуры в таких условиях.

Установлено, что воздействие постоянным магнитным полем 0,3 Тл в течение разных промежутков времени (от 0,4 до 2 ч) приводит к обратимому снижению микротвердости Al независимо от чистоты металла. Показано, что релаксация микротвердости происходит по экспоненциальному закону. Выявлено, что многократная обработка Al с содержанием Fe 0,26% приводит к снижению начального эффекта магнитного воздействия и времени, необходимого для достижения HV исходного значения, а именно: 1 обработка $\delta = -0,083$, время релаксации 51 час; 2 обработка $\delta = -0,053$, время релаксации 29 часов; 3 обработка $\delta = -0,035$, время релаксации 1 час. Для Al с содержанием Fe 0,22% определено пороговое значения индукции постоянного магнитного поля ($B_p = 0,10$ Тл), выше которого возможно наблюдение эффекта снижения микротвердости. Дальнейшее увеличение индукции магнитного поля приводит к линейному возрастанию эффекта.

Показано, что максимальное влияние постоянного магнитного поля на микротвердость Al достигается при времени выдержки $t \approx 2$ часа, дальнейшее увеличение времени не приводит к усилению эффекта. Выявлена зависимость скорости ползучести Al, определяемой на линейной стадии процесса, от величины индукции магнитного поля в диапазоне до 0,3 Тл. Показано, что воздействие магнитного поля ($B = 0,10 - 0,30$ Тл) на скорость ползучести Al носит немонотонный характер: влияние магнитного поля с $B = 0 - 0,15$ Тл приводит к увеличению скорости ползучести на 55 %, а при $B = 0,15 - 0,30$ Тл она уменьшается на такую же величину. Анализ дислокационной субструктуры, формирующейся на стадии установившейся ползучести Al, показал, что присутствие магнитного поля приводит к большему накоплению скалярной плотности дислокаций, формирующих, преимущественно, структуру дислокационного хаоса; к более развитому процессу формирования дислокационных петель; к формированию вдоль границ блоков вторичной блочной системы. Установлено, что в присутствии магнитного поля формирующийся рельеф поверхности разрушения (ямки вязкого разрушения) обладает меньшими средними размерами, по сравнению с обычными условиями эксперимента. Результатом анализа накопленных экспериментальных данных стала качественная модель влияния магнитного поля на процесс пластического деформирования Al, которая установила, что основным механизмом, отвечающим за их изменение, является увеличение подвижности дислокаций за счет снижения энергетического барьера их закрепления.

В четвертом разделе «ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СПЛАВА АК5М2 ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИНТЕНСИВНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ» представлены результаты исследований влияния интенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии от 10 до 50 Дж/см² с шагом 10 Дж/см² и временем импульса 50 и 200 мкс на микротвердость, износостойкость, параметры кристаллического строения, структуру, элементный и фазовый состав сплава АК5М2.

Установлено, что воздействие интенсивным импульсным электронным пучком на сплав АК5М2 приводит к увеличению микротвердости поверхности обработки. Значения микротвердости находятся в зависимости от плотности энергии пучка электронов и длительности импульса воздействия (рисунок 1 а). Максимальные увеличения микротвердости (0,95 ГПа) наблюдаются при параметрах интенсивного импульсного электронного пучка 50 Дж/см² и 50 мкс, что превышает микротвердость исходного материала на 83% (значение микротвердости сплава АК5М2 в исходном состоянии равно 0,52 ГПа). Помимо микротвердости облучение интенсивным импульсным электронным пучком приводит к увеличению износостойкости поверхности модифицирования

(рисунок 1 б). Выявлено, что рациональными, с точки зрения износостойкости, параметрами интенсивного импульсного электронного пучка являются 50 Дж/см^2 , 200 мкс. При данном режиме облучения происходит 197 % увеличение износостойкости, а именно коэффициент износа в исходном состоянии $k = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, после облучения интенсивным импульсным электронным пучком $k = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$.

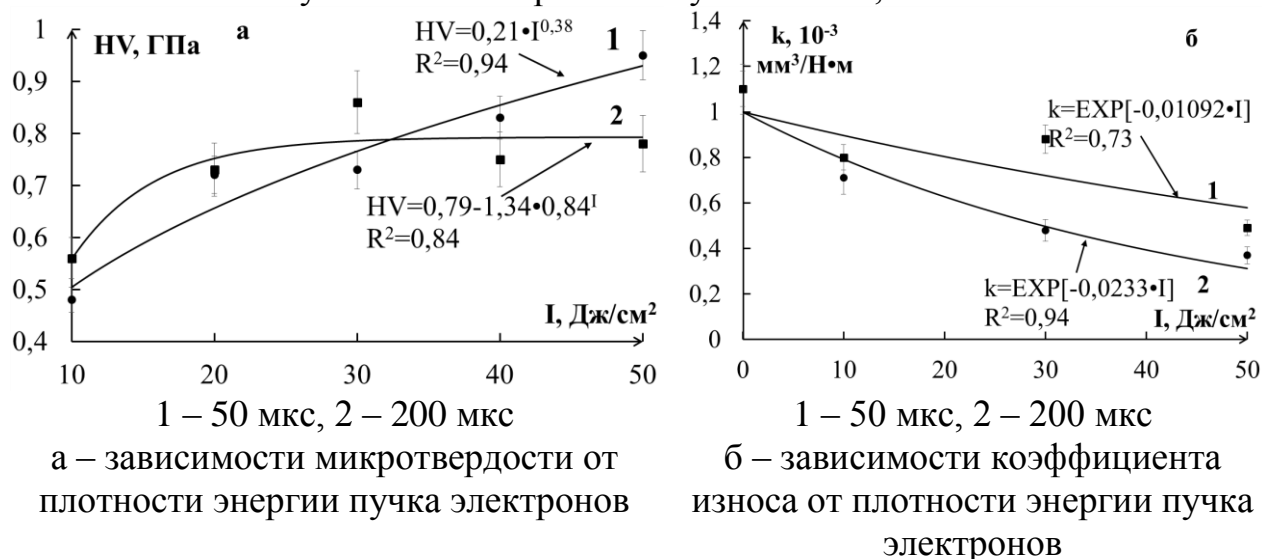


Рисунок 1 – Зависимости микротвердости и коэффициента износа от плотности энергии пучка электронов

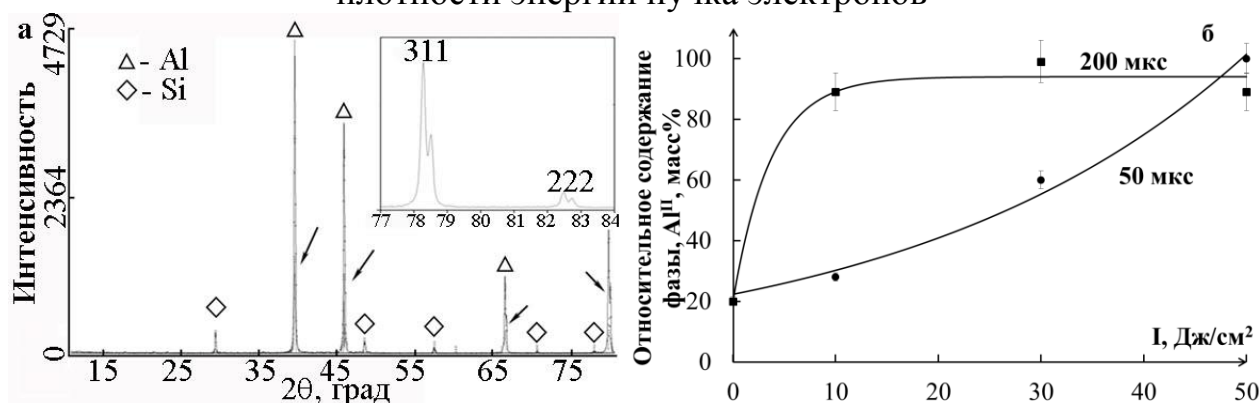
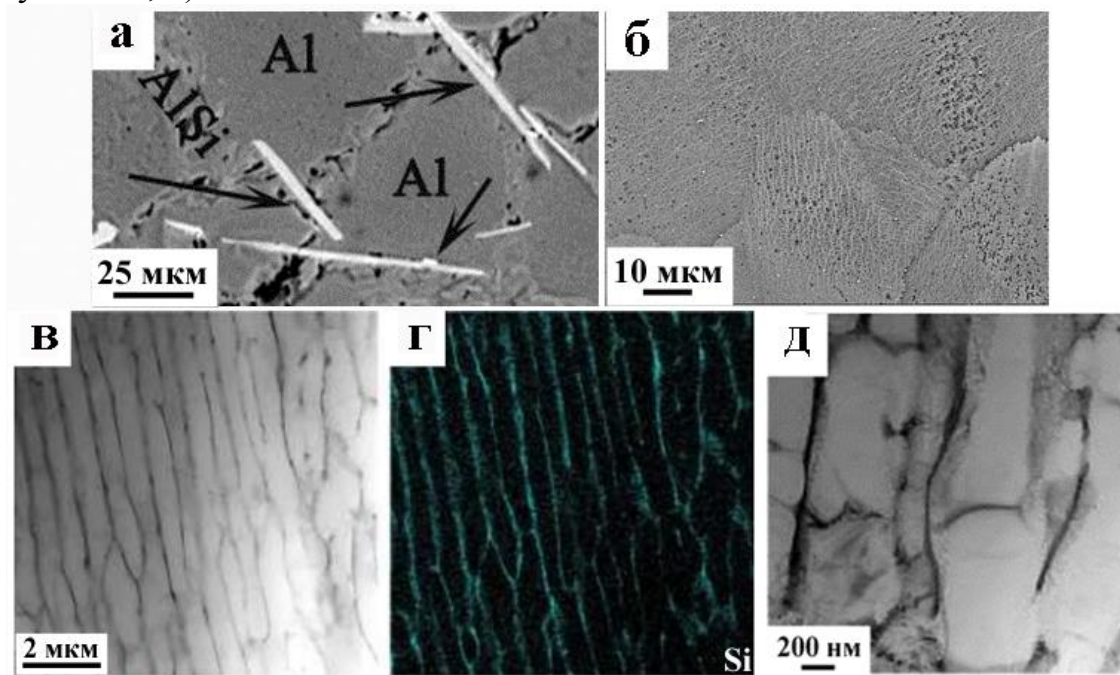


Рисунок 2 – Рентгенограмма исходного сплава АК5М2 и зависимости относительного содержания фазы Al^{II} в поверхностном слое сплава от плотности энергии пучка электронов

Рентгеноструктурный анализ показал, что в исходном состоянии основными фазами сплава АК5М2 являются два твердых раствора на основе алюминия, различающихся параметром кристаллической решетки. Данный вывод сделан из наблюдаемого на рентгенограмме расщепления дифракционных максимумов алюминия, (вставка на рисунке 2 а).

Дополнительно к основным фазам обнаруживаются кремний и интерметаллиды, одним из которых является фаза состава $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{Si}_2$. Облучение интенсивным импульсным электронным пучком приводит к перераспределению относительного содержания фаз твердого раствора на основе алюминия, а именно при длительности 200 мкс и плотности энергии 30 Дж/см^2 относительное содержание фазы алюминия (обозначена Al^{II} на рисунке 2 б) с меньшим параметром кристаллической решетки составляет $\approx 99 \text{ масс.}\%$, в противовес $20,0 \text{ масс.}\%$ в исходном состоянии.

Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что облучение сплава АК5М2 сопровождается плавлением и растворением частиц интерметаллидов и кремния, формированием вдоль границ зерен закалочных микротрещин. Указанные структурные изменения начинаются с плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 , однако при данных параметрах пучка растворение частиц интерметаллидов и кремния носит незавершенный характер. При 50 Дж/см^2 поверхность облучения фрагментирована микротрещинами, размеры фрагментов десятки-сотни микрометров, частицы интерметаллидов и кремния не выявляются (рисунок 3 а, б).



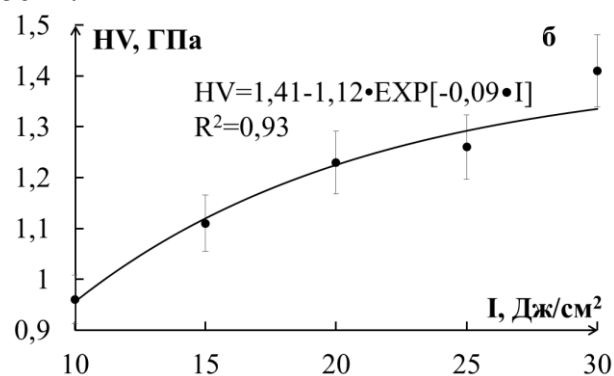
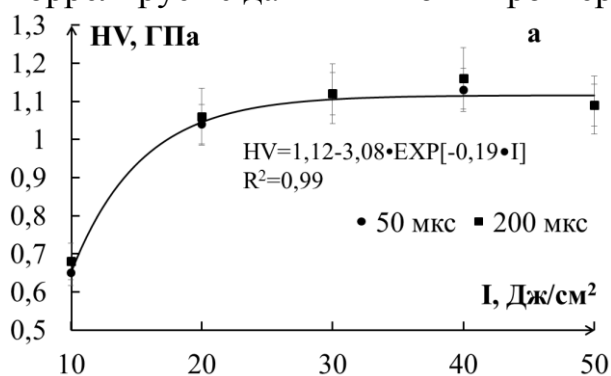
а – структура литого сплава АК5М2 (стрелками указаны интерметаллиды), б – структура сплава АК5М2 после облучения интенсивным импульсным электронным пучком с параметрами 50 Дж/см^2 , 50 мкс, в – ячеистая структура сплава после облучения, г – изображение структуры представленной на (в), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов кремния, д – ячеистая структура обнаруживаемая методами просвечивающей электронной микроскопии

Рисунок 3 – Микрофотографии структуры сплава АК5М2 в литом состоянии и после облучения электронным пучком

Воздействие интенсивного импульсного электронного пучка с параметрами 30-50 Дж/см², не зависимо от длительности импульсов (50 или 200 мкс), приводит к формированию в слое толщиной до 50-70 мкм структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации (рисунок 3 в), разделенной прослойками кремния (рисунок 3 г). Размеры ячеек колеблются в интервале 10-200 нм, размеры прослоек 10-20 нм (рисунок 3 д).

В пятом разделе «ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СУБСТРУКТУРУ СПЛАВА АК10М2Н» представлены результаты исследований влияния интенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии пучка электронов от 10 до 50 Дж/см² с шагом 10 Дж/см², временем импульса 50 и 200 мкс и от 10 до 35 Дж/см² с шагом 5 Дж/см², временем импульса 150 мкс на микротвердость, износостойкость, параметры кристаллического строения, структуру, элементный и фазовый состав сплава АК10М2Н.

Установлено, что облучение интенсивным импульсным электронным пучком, независимо от времени импульса 50, 150 и 200 мкс, сопровождается увеличением микротвердости (рисунок 4). Оптимальным режимом обучения, приводящем к максимальному увеличению микротвердости с 0,72 ГПа (исходное состояние) до 1,41 ГПа (после обработки), является режим с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см² и временем импульса 150 мкс (рисунок 4 б). Распределение нанотвердости облученного сплава по глубине, говорит о немонотонности данной зависимости. Максимальное значение нанотвердости наблюдается на глубине 40-60 мкм и превышает нанотвердость исходного материала в 2,9-3 раза. В слое, прилегающем к поверхности облучения, т.е. расположенном на глубине ≈5 мкм, величина нанотвердости превышает твердость исходного сплава в ≈1,96 раза, что коррелирует с данными по микротвердости.



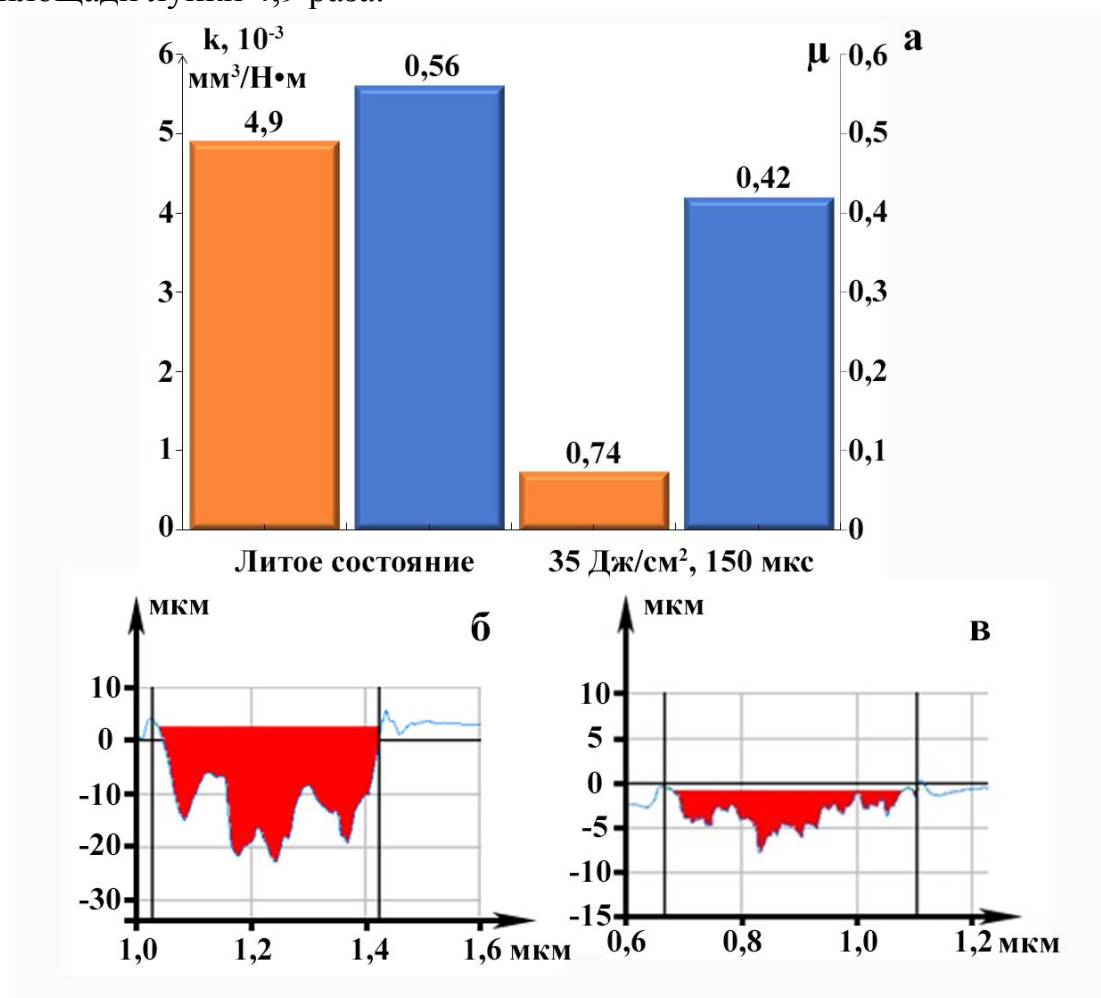
(а) – плотность энергии пучка электронов 10, 20, 30, 40, 50 Дж/см² длительность пучка электронов 50 и 200 мкс;

(б) – 10, 15, 20, 30, 35 Дж/см², длительность пучка электронов 150 мкс

Рисунок 4 – Изменение микротвердости поверхности сплава АК10М2Н, облученного интенсивным импульсным электронным пучком с различными параметрами

Одновременно с ростом микро- и нанотвердости в облученных образцах наблюдается снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания (рисунок 5 а). По сравнению с материалом в исходном состоянии коэффициент трения снизился в $\approx 1,3$ раза, коэффициент износа – в $\approx 6,6$ раза, при параметрах трибонагружения $P=1$ Н, $V=25$ мм/с.

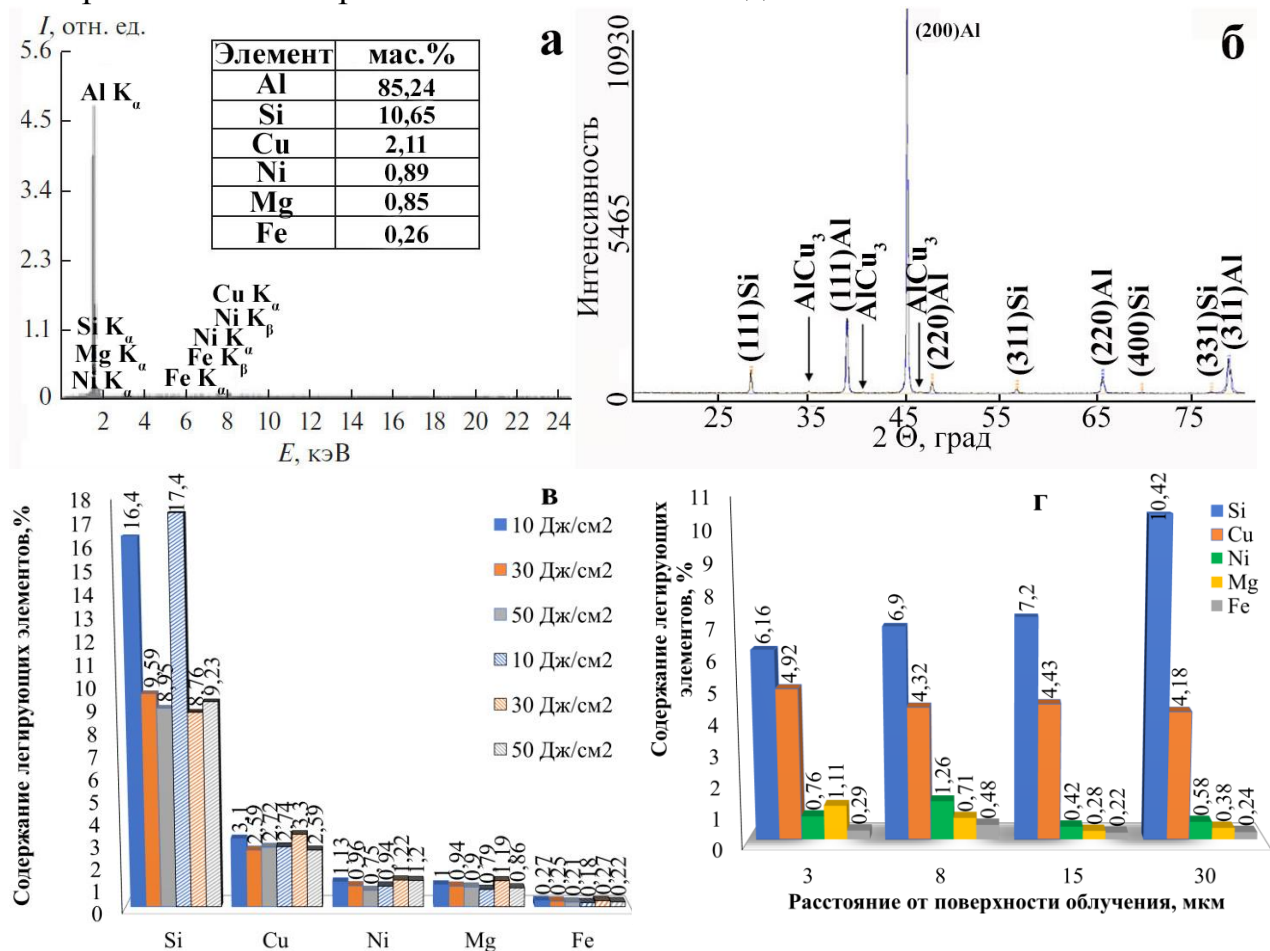
Анализ профилей триботреков испытанных образцов показал, что профиль дорожки трения является крайне изрезанным (рисунок 5 б, в), это связано с развитием процессов схватывания и выкрашивания, сопровождающимися вырывами материала с поверхности трения. Были определены количественные параметры триботрека. Сравнение триботреков до (рисунок 5 б) и после (рисунок 5 в) облучения показывает, что глубина и площадь лунки снижается после обработки интенсивным импульсным электронным пучком. Уменьшение для глубины лунки составило 3,6 раза, для площади лунки 4,9 раза.



а – зависимости параметра износа и коэффициента трения от состояния сплава (литое или после облучения электронным пучком 35 Дж/см², 150 мкс), б – профиль триботрека литого сплава, в - профиль триботрека сплава после облучения электронным пучком 35 Дж/см², 150 мкс

Рисунок 5 – Результаты измерения параметра износа k , коэффициента трения μ и профили треков износа сплава АК10М2Н

Атомно-силовая микроскопия показала, что обработка интенсивным импульсным электронным пучком формирует в сплаве АК10М2Н мелкозернистую ячеистую структуру, отсутствуют дефекты в виде микропор. Шероховатость обработанного интенсивным импульсным электронным пучком слоя находится в диапазоне от 17 до 90 нм, основного объема материала вблизи обработанного слоя – от 30 до 77 нм.



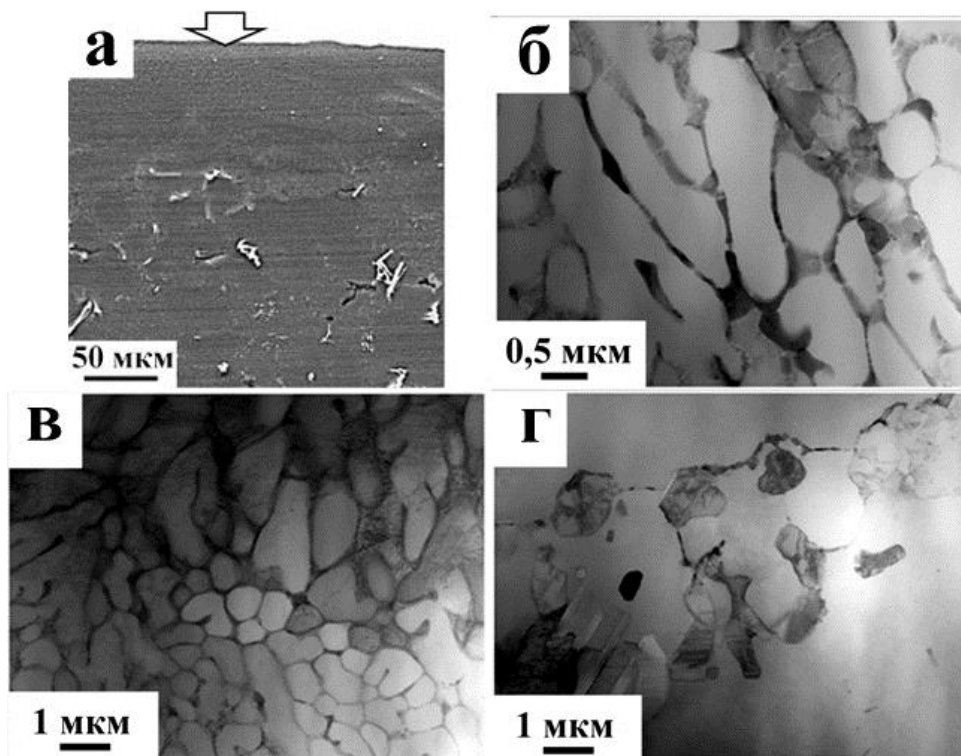
а – энергетические спектры сплава АК10М2Н в исходном состоянии, б – участок рентгенограммы сплава АК10М2Н в исходном состоянии; в – содержание легирующих элементов и основных примесей после облучения по режимам плотность энергии пучка 10, 30, 50 Дж/см², время импульса 50 и 200 мкс; г – зависимость концентрации легирующих элементов от расстояния до поверхности облучения при плотности энергии пучка электронов 25 Дж/см² и длительности импульса 150 мкс

Рисунок 6 – Результаты рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализ и зависимости содержания легирующих элементов от параметров облучения и расстояния до поверхности облучения

Методами рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что основной объем исследуемого сплава, находящегося в исходном состоянии, это алюминий, а легирующими элементами являются кремний, медь, никель, магний, неоднородно

распределенные по объему (рисунок 6 а). Фазовый анализ показал, что основными фазами исходного материала являются твердые растворы на основе алюминия и кремния, дополнительно обнаруживаются фазы AlCu_3 , Cu_9Al_4 , $\text{Cu}_{8,92}\text{Al}_{4,08}$, $\text{Cu}_{5,64}\text{Al}_{4,61}$ (рисунок 6 б).

Установлено, что воздействие интенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии 10 Дж/см^2 приводит к увеличению концентрации кремния в поверхностных слоях материала с 10,65 % до 16,4 % и 17,4 % при длительности импульса 50 мкс и 200 мкс соответственно (рисунок 6 в). Увеличение плотности энергии пучка электронов приводит к снижению концентрации кремния, а минимальная концентрация наблюдается при плотности энергии 25 Дж/см^2 , длительности импульса 150 мкс и составляет 5,74 %. Исследования концентрации легирующих элементов от расстояния до поверхности облучения показали, что концентрация кремния снижается в поверхностном слое толщиной до 30 мкм, на большем расстоянии от поверхности облучения концентрация кремния достигает значений исходного материала (рисунок 6 г).



а – сканирующая электронная микроскопия (стрелкой указана поверхность облучения), б – структура слоя примыкающего к поверхности облучения, наблюдаемая методами просвечивающей электронной микроскопии, в – структура слоя, расположенного на расстоянии $X = 70 \text{ мкм}$ от поверхности облучения, г – структура слоя при $X = 120 \text{ мкм}$

Рисунок 7 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного шлифа сплава АК10М2Н, облученного интенсивным импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 35 Дж/см^2 , временем импульса 150 мкс

Воздействие интенсивного импульсного электронного пучка приводит к перераспределению фазового состава. Количество фаз, процент их относительного содержания, параметр кристаллической решетки также находятся в зависимости от режимов облучения.

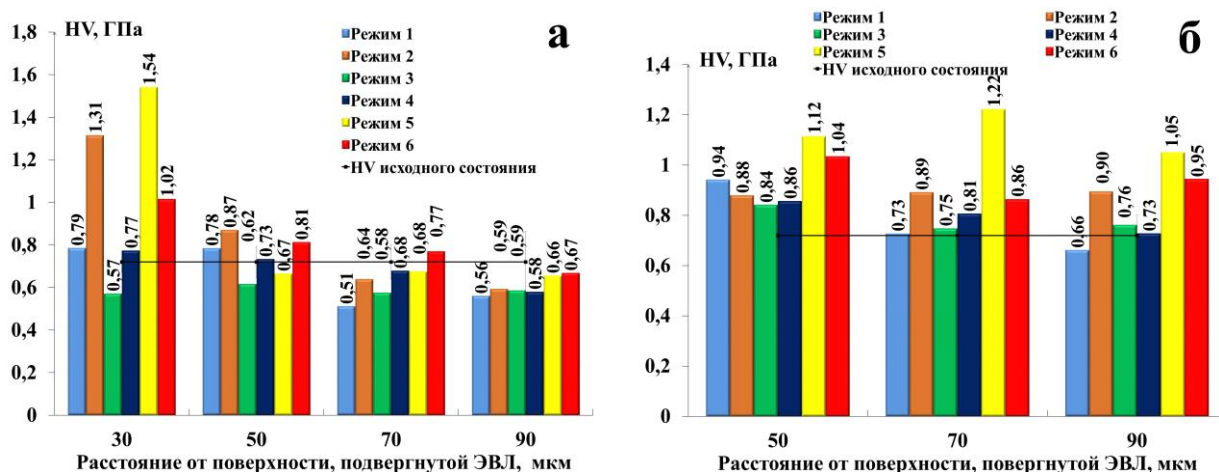
Установлено, что обработка интенсивным импульсным электронным пучком приводит к гомогенизации поверхностных слоев сплава АК10М2Н. Толщина гомогенизированного слоя варьируется в зависимости от параметров обработки и достигает максимальных значений 100 мкм при плотности энергии 35 Дж/см² (рисунок 7 а).

Выявлено, что облучение сопровождается формированием градиентной структуры. Структура ячеистой кристаллизации переходит, по мере удаления от поверхности обработки, в структуру смешанного типа, в которой наряду с ячейками присутствуют частично не растворившиеся включения литейного происхождения (рисунок 7 б-г).

Обнаружено, что модифицированный слой, толщиной от 35 до 100 мкм, в зависимости от плотности энергии пучка электронов, свободен от интерметаллидов и состоит из нанокристаллической структуры ячеистой кристаллизации. Высказано предположение, что эти два фактора являются причиной повышенных механических и трибологических характеристик модифицированного слоя.

Шестой раздел «СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИЯ СВОЙСТВ СПЛАВА АК10М2Н ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СИСТЕМОЙ Al-Y₂O₃» посвящён исследованию сплава АК10М2Н, подвергнутого импульсному многофазному ионно-плазменному воздействию методом электровзрывного легирования по шести режимам, различающихся массой порошковой навески Y₂O₃ (29,5, 58,9 и 88,3 мг) и напряжением разряда (2,6 и 2,8 кВ).

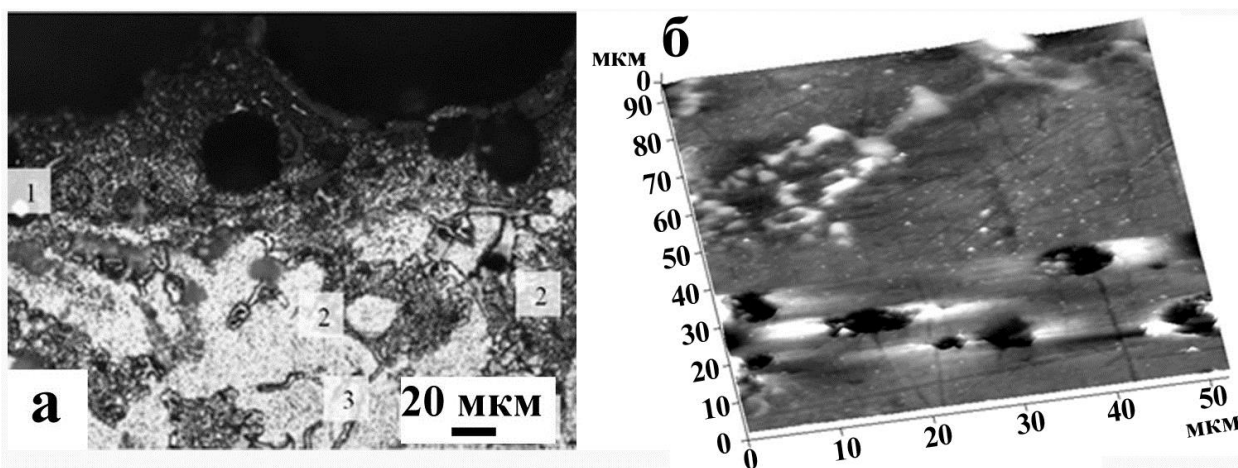
Установлено, что независимо от режимов электровзрывного легирования происходит увеличение микротвердости поверхностных слоев сплава. Распределение профиля микротвердости по глубине (рисунок 8) показало, что микротвердость, как в зернах (рисунок 8 а), так и в эвтектике (рисунок 8 б) модифицированных образцов, снижается по мере удаления от поверхности модифицирования и на глубине порядка 100 мкм становится равно значению исходного материала. Определены режимы обработки, приводящие к максимальному увеличению микротвердости, а именно: режим 2 (напряжение разряда – 2,8 кВ; масса алюминиевой фольги – 58,9 мг.; масса порошка Y₂O₃ – 58,9 мг) и режим 5 (напряжение разряда – 2,6 кВ; масса алюминиевой фольги – 58,9 мг; масса порошка Y₂O₃ – 88,3 мг).



а – тело зерна, б – эвтектика,
сплошная линия показывает микротвердость исходного материала
Рисунок 8 – Распределение микротвердости фаз сплава АК10М2Н в зависимости от расстояния до поверхности модифицирования

Выявлено, что электровзрывное легирование приводит к формированию поверхности, износостойкость и нанотвердость которой многократно превышает значения сплава в исходном состоянии.

Исследования структуры профиля поверхности сплава АК10М2Н методами металлографической (рисунок 9 а) и атомно-силовой (рисунок 9 б) микроскопии показали, что электровзрывное легирование приводит к формированию многослойной структуры, которая состоит из высокопористого покрытия, неоднородного по толщине, слоя жидкофазного легирования и слоя термического влияния. Толщина модифицированного слоя изменяется в пределах 50-120 мкм.

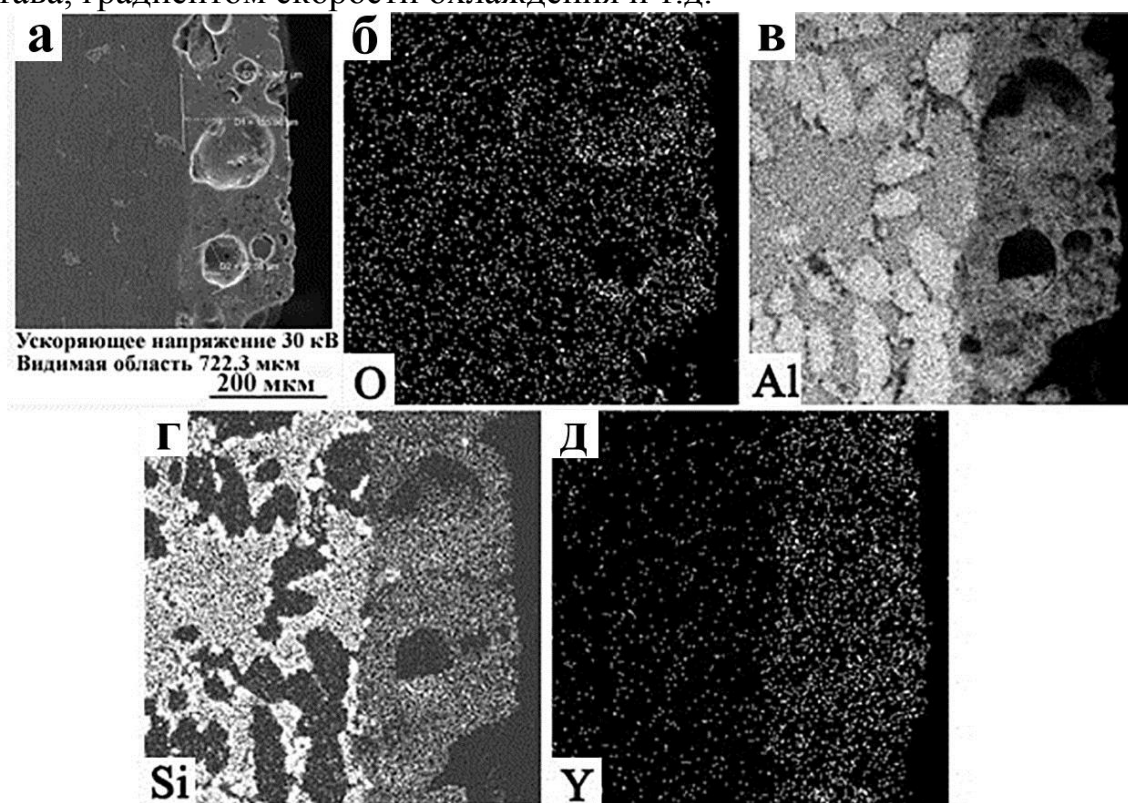


а – оптическая микроскопия (1 – модифицированный слой, 2 – эвтектика, 3 – зерно алюминия), б – атомно-силовая микроскопия

Рисунок 9 – Профили поверхности образцов сплава АК10М2Н после модифицирования по режиму 2

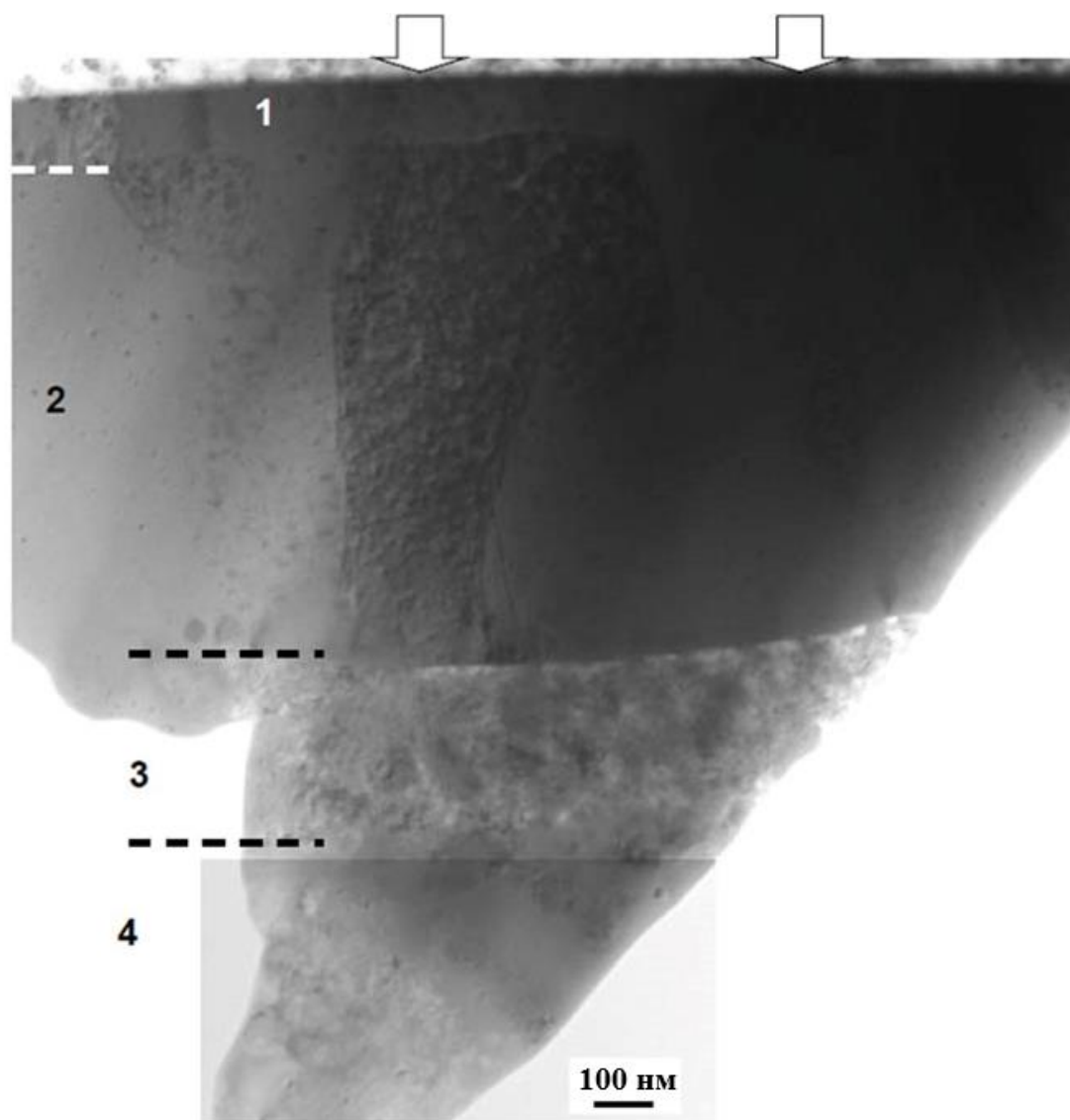
Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что электровзрывное легирование сопровождается формированием высокопористого поверхностного слоя толщиной 50 – 150 мкм (рисунок 10 а), характеризующегося неоднородностью в распределении легирующих элементов (кремний, иттрий и кислород) (рисунок 10), субмикро- и наноразмерной многофазной структурой, упрочняющими фазами которой являются частицы кремния, Y_2O_3 , YSi_2 и $Y_2Si_2O_7$.

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии осуществлен анализ дефектной субструктуры поверхностного модифицированного слоя. Выявлено образование многослойной структуры, состоящей из четырех слоев (рисунок 11): поверхностного слоя (слой 1), промежуточных слоев (слой 2 и слой 3) и переходного слоя (слой 4). Формирование многослойной структуры может быть обусловлено действием ряда факторов: градиентом температурного поля, вариацией элементного состава, градиентом скорости охлаждения и т.д.



а – микрофотография поперечно шлифа после электровзрывного легирования, полученная методами сканирующей электронной микроскопии, б – изображение, представленное на (а) полученное в рентгеновском излучении атомов О, в – изображение, представленное на (а) полученное в рентгеновском излучении атомов Al, г - изображение, представленное на (а) полученное в рентгеновском излучении атомов Si, д – изображение, представленное на (а) полученное в рентгеновском излучении атомов Y

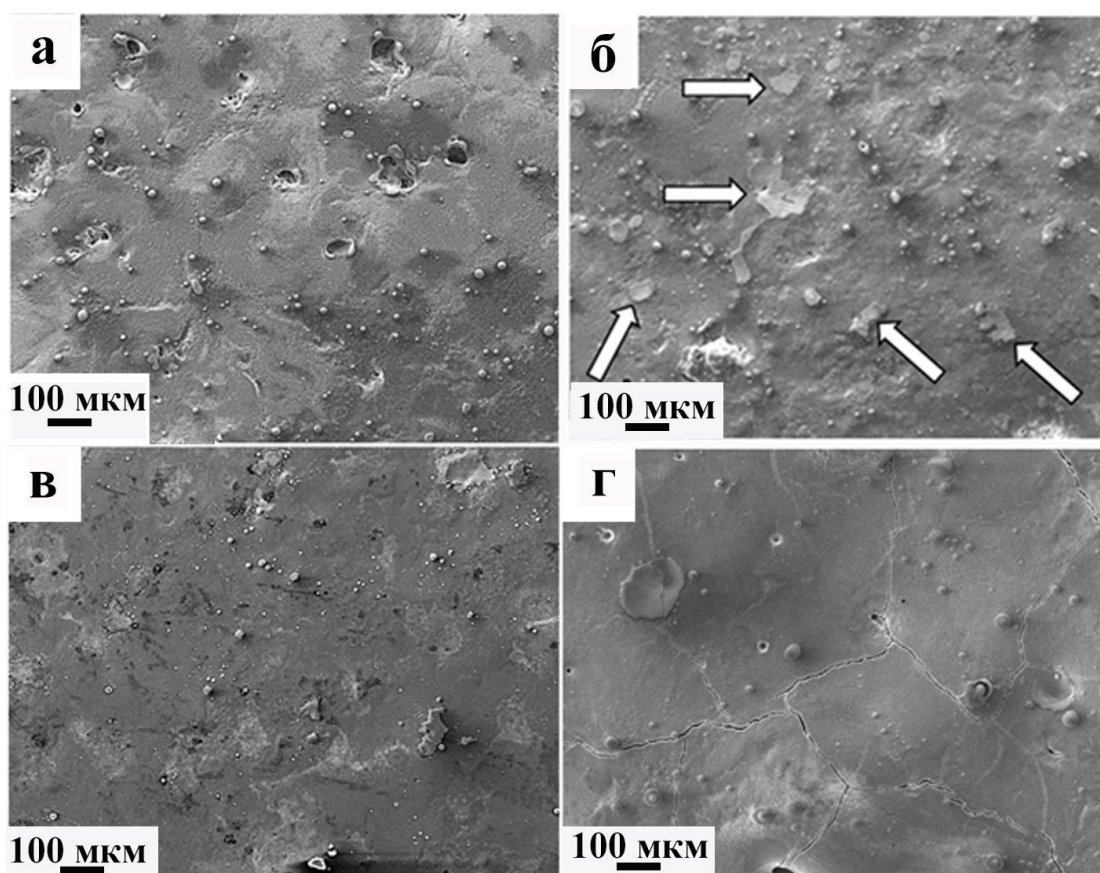
Рисунок 10 – Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава АК10М2Н после электровзрывного легирования



1 – поверхностный слой, 2-3 – промежуточные слои, 4 – переходный слой, стрелками показана поверхность воздействия электрическим взрывом

Рисунок 11 – Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава Al-Si-Y-O

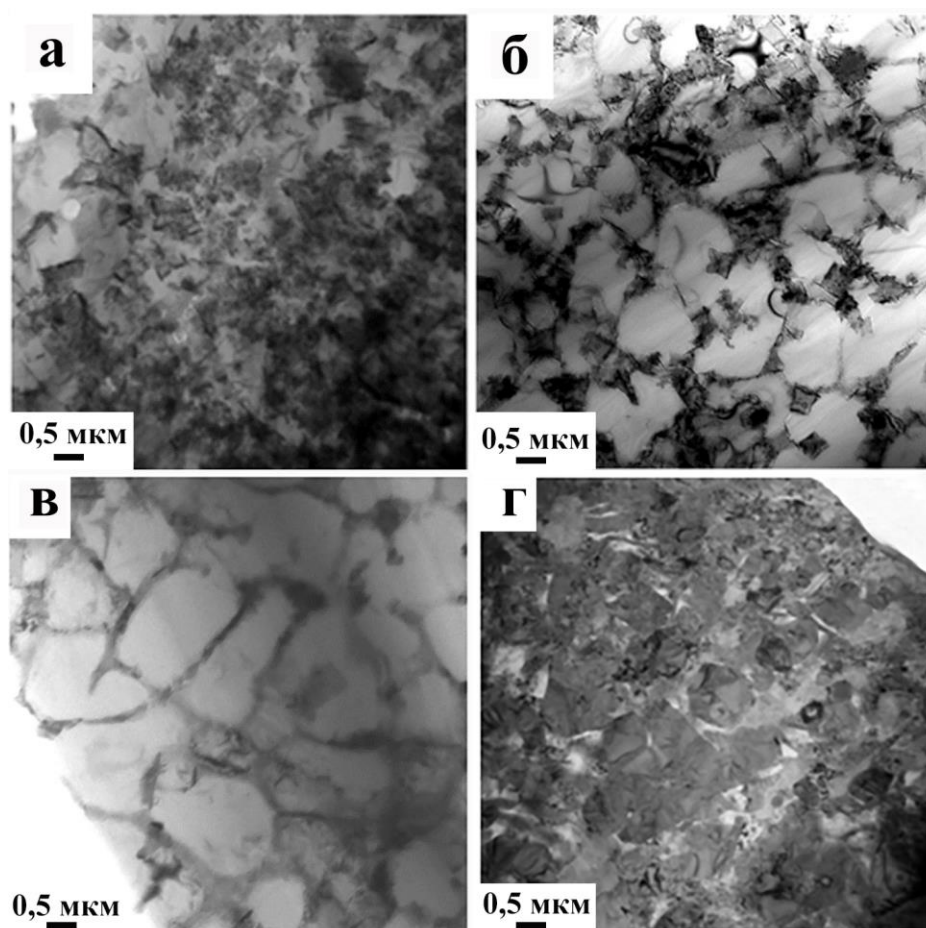
В седьмом разделе «СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СПЛАВА АК10М2Н ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ» посвящён исследованию сплава АК10М2Н подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке, состоящей из последовательного электровзрывного легирования системой Al-Ti-Y₂O₃ (масса фольги Al-Ti 58,9 мг, масса порошковой навески Y₂O₃ 58,9 мг и 88,3 мг, напряжение разряда 2,6 кВ и 2,8 кВ) и обработки сформированного покрытия интенсивным импульсным электронным пучком по режимам 25 Дж/см² и 35 Дж/см². В совокупности выполнено четыре варианта модифицирования: 1 - Y₂O₃=58,9 мг, U=2,8 кВ, E_s=25 Дж/см²; 2 - Y₂O₃=88,3 мг, U=2,6 кВ, E_s=25 Дж/см²; 3 - Y₂O₃=58,9 мг, U=2,8 кВ, E_s=35 Дж/см²; 4 - Y₂O₃=88,3 мг, U=2,6 кВ, E_s=35 Дж/см².



а – режим №1, б – режим №2, в – режим №3, г – режим №4,
на (б) стрелками показаны тонкопленочные образования
Рисунок 12 – Электронно-микроскопические изображения поверхности
сплава АК10М2Н после электронно-ионно-плазменной обработки по
различным режимам

Методами сканирующей электронной микроскопии поверхности сплава АК10М2Н, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке установлено, что при режиме №1 формируется рельефная поверхность, содержащая большое количество микрократеров и частиц капельной фракции (рисунок 12 а). Увеличение массы порошковой навески до 88,3 мг и снижение напряжения разряда до 2,6 кВ без изменения плотности энергии пучка электронов приводит к: 1) существенному снижению количества микрократеров на модифицируемой поверхности; 2) присутствию на поверхности тонкопленочных образований осколочной формы (рисунок 12 б, указано стрелками); 3) формированию в поверхностном слое областей, имеющих субмикрокристаллическую структуру со средним размером кристаллитов 0,83 мкм.

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 35 Дж/см² режимы №3 и №4 (рисунок 12 в, г), так же приводит к формированию рельефной поверхности, содержащей области, различающиеся контрастом. Следует отметить, что при режиме №4 происходит фрагментация поверхностного слоя микротрещинами, на модифицированной поверхности обнаруживаются микропоры, микрократеры, наплывы материала.



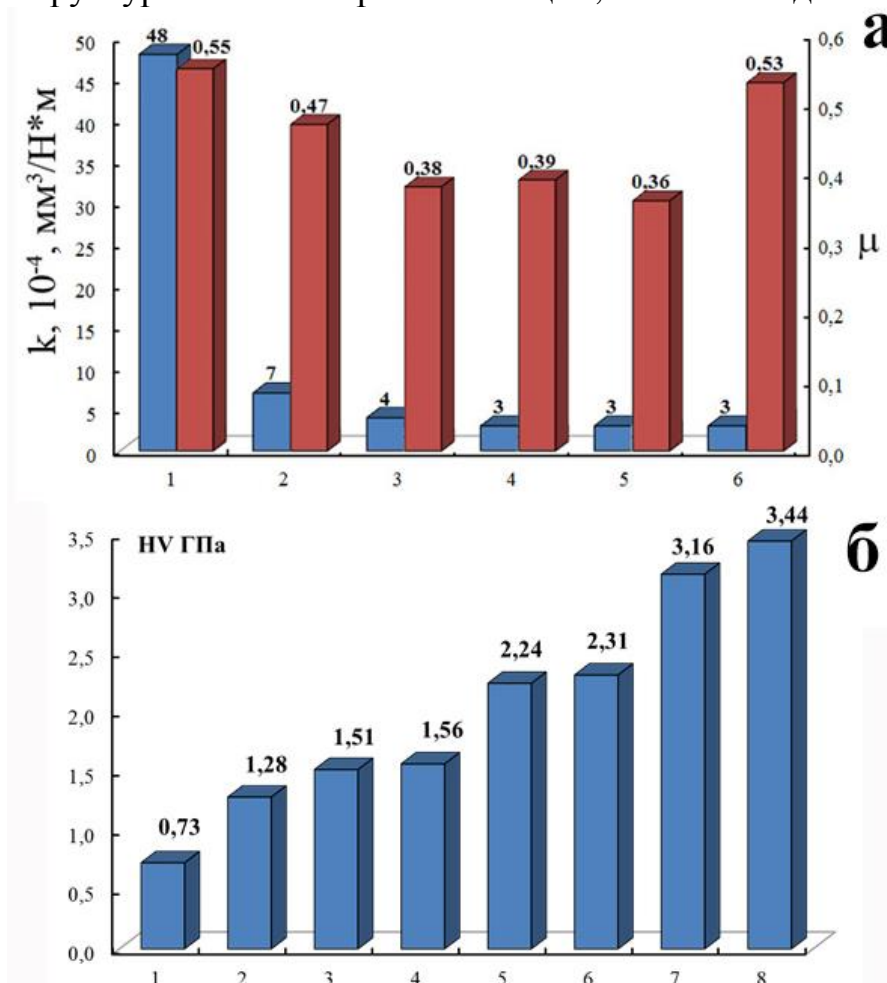
а – режим №1, б – режим №2, в – режим №3, г – режим №4, слой материала, примыкающий к поверхности модифицирования
 Рисунок 13 – Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава АК10М2Н, подвергнутого комплексной электронно-ионно-плазменной обработке по различным режимам

Анализируя структурные особенности плоскости, перпендикулярной относительно поверхности модифицирования можно отметить, что толщина модифицированного слоя, для режимов №1 и №2, изменяется в пределах от 40 мкм до 70 мкм, для режимов №3 и №4, от 45 мкм до 80 мкм. Модифицированный слой имеет субмикро- нанокристаллическую структуру и свободен от включений кремния и интерметаллидов, присутствующих в исследуемом исходном состоянии материала.

Микрорентгеноспектральный и рентгенофазовый анализ показали, что электронно-ионно-плазменная обработка сплава АК10М2Н сопровождается формированием многофазного субмикро- нанокристаллического слоя, обогащенного атомами иттрия и титана. Глубина проникновения легирующих элементов в материал зависит от режима модифицирования и составляет для режима №1 – 60 мкм; для режима №2 – 80 мкм; для режима №3 – 150 мкм, для режима №4 – 170 мкм.

Просвечивающий электронно-микроскопический анализ показал, что независимо от режима электронно-ионно-плазменной обработки, строение поверхностных слоев сплава АК10М2Н характеризуется структурой ячеистой кристаллизации, ячейки разделены прослойками фазы Si (рисунок

13). Размеры ячеек изменяются в пределах от 0,5 мкм до 1,2 мкм. Толщина прослойки изменяется в пределах 50-75 нм. Толщина слоя, в котором выявляется структура ячеистой кристаллизации, составляет до 100 мкм.



а – зависимость коэффициента трения (μ) и величины параметра износа (k) от состояния образцов сплава АК10М2Н. 1 – исходное состояние; 2 – состояние после облучения интенсивным импульсным электронным пучком ($25 \text{ Дж}/\text{см}^2$); 3-6 – состояние после электронно-ионно-плазменной обработки: 3 – режим №1; 4 – режим №2; 5 – режим №3; 6 – режим №4;

б – микротвердость поверхности сплава АК10М2Н в зависимости от способа модификации. 1 – исходное состояние; 2 – электровзрывное легирование (масса порошковой навески $\text{Y}_2\text{O}_3 = 58,9 \text{ мг}$, напряжение разряда $U=2,8 \text{ кВ}$); 3 – электровзрывное легирование ($\text{Y}_2\text{O}_3 = 88,3 \text{ мг}$ $U=2,6 \text{ кВ}$); 4 – интенсивный импульсный электронный пучок ($25 \text{ Дж}/\text{см}^2$) 5 – электронно-ионно-плазменная обработка (режим №1); 6 – электронно-ионно-плазменная обработка (режим №2); 7 – электронно-ионно-плазменная обработка (режим №3); 8 – электронно-ионно-плазменная обработка (режим №4)

Рисунок 14 – Зависимости коэффициента трения (μ), величины параметра износа (k) и микротвердости от состояния образцов сплава АК10М2Н

Выявленные преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя сплава оказали существенное влияние на механические

и трибологические свойства материала. Установлено, что износостойкость материала подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке, независимо от ее режима, увеличивается в 18-20 раз по отношению к исходному сплаву и в 2,6-2,8 раз по отношению к сплаву, облученному интенсивным импульсным электронным пучком (рисунок 14 а). Выявлено снижение коэффициента трения при режимах электронно-ионно-плазменной обработки № 1-3 по отношению к исходному сплаву в $\approx 1,5$ раза и по отношению к сплаву, облученному интенсивным импульсным электронным пучком, в $\approx 1,3$ раза. При электронно-ионно-плазменной обработке по режиму №4 коэффициент трения модифицированного слоя близок к величине коэффициента трения исходного сплава.

Результаты изменения микротвердости поверхности сплава АК10М2Н в зависимости от способа модификации представлены на рисунке 14 б. Электронно-ионно-плазменная обработка с энергией пучка электронов 25 Дж/см^2 (режимы №1 и №2) приводит к увеличению микротвердости в $\sim 3,1$ раза (2,24 ГПа и 2,31 ГПа – соответственно) по сравнению с 0,73 ГПа – исходное состояние. Электронно-ионно-плазменная обработка с энергией пучка электронов 35 Дж/см^2 (режимы №3 и №4), приводит к увеличению микротвердости в 4,3 раза (3,16 ГПа) и в 4,7 раза (3,44 ГПа) в зависимости от режима, по сравнению с 0,73 ГПа – исходное состояние, что коррелирует с данными трибологических испытаний.

В восьмом разделе «ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ» приводится описание разработанных в ходе выполнения диссертационной работы новых технических решений, заключающихся в регулировании деформационного поведения алюминия за счет воздействия магнитными полями и существенное повышение эксплуатационных характеристик сплавов АК5М2 и АК10М2Н при работе в условиях трения скольжения. Итогом применения разработанных методов и технологий стало их внедрение на заводах АО «Аркони́к СМЗ», АО «РУСАЛ Новокузнецк» и малых производственных предприятиях ООО «ВЕСТ 2002», ООО «РЕМКОМПЛЕКТ». Фундаментальная составляющая работы была использована в научно-исследовательской и образовательной деятельности ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», соответствующие акты практического использования результатов работы представлены в приложениях диссертации.

В заключении изложены основные результаты исследования.

В приложениях приведены справки об использовании и апробации результатов диссертационной работы на промышленных предприятиях и в учебных заведениях.

Основные результаты и выводы

Результатом выполнения работы стала установленная физическая природа и закономерности увеличения механических и трибологических свойств Al-Si сплавов за счет формирования субмикро- и нанокристаллических, градиентных структур, возникающих в материалах после электронно-ионно-плазменных воздействий. В результате теоретических оценок, базирующихся на полученных экспериментальных данных, влияния магнитного поля на процесс пластического деформирования Al установлено, что основным механизмом, отвечающим за их изменение, является увеличение подвижности дислокаций за счет снижения энергетического барьера их закрепления. Основные выводы:

1. Установлено, что воздействие постоянными магнитными полями величиной до 0,3 Тл приводит к обратимому снижению HV алюминия независимо от чистоты металла, релаксация HV происходит по экспоненциальному закону. Исследования процесса ползучести показали, что зависимость скорости ползучести от величины магнитной индукции носит немонотонный характер: влияние магнитного поля с $B = 0 - 0,15$ Тл приводит к увеличению скорости ползучести на 55 %, а при $B = 0,15 - 0,30$ Тл она уменьшается на такую же величину, это связано с слабополевыми и сильнополевыми способами влияния магнитного поля на поведение точечных дефектов.

2. Методами сканирующей и просвечивающей электронных микроскопий установлено, что присутствие магнитного поля в процессе ползучести приводит к (1) большему накоплению скалярной плотности дислокаций, (2) к более развитому процессу формирования дислокационных петель, (3) к формированию вдоль границ блоков вторичной блочной системы, (4) снижению средних размеров ямок вязкого разрушения.

3. Установлено, что основным механизмом, отвечающим за изменение HV и скорости ползучести Al в условия действия магнитных полей является увеличение подвижности дислокаций за счет снижения энергетического барьера их закрепления.

4. Выполнена модификация поверхности сплавов АК5М2 и АК10М2Н интенсивным импульсным электронным пучком в различных режимах, отличающихся плотностью энергии электронного пучка от 10 до 50 Дж/см² и временем импульса от 50 до 200 мкс. Произведена обработка сплава АК10М2Н многофазной плазмой (Al-Y₂O₃), полученной методом электрического взрыва проводника, по шести режимам.

5. В результате анализа изменений HV, k и μ сплавов АК5М2 и АК10М2Н, вызванных интенсивным импульсным электронным пучком и электровзрывным легированием в различных режимах, определены по два оптимальных режима для каждого из воздействий, приводящие к максимальному увеличению HV, снижению k и μ . Установленные режимы воздействия были скомбинированы для электронно-ионно-плазменной

обработки, сочетающей электровзрывное легирование системой Al-Ti-Y₂O₃ и последующее облучение интенсивным импульсным электронным пучком, поверхности сплава АК10М2Н.

6. Установлено, что независимо от параметров модификации электровзрывное легирование или интенсивный импульсный электронный пучок (как самостоятельных методов), комплексная обработка, приводит к более существенным изменениям HV, k и μ для сплава АК10М2Н. Определено, что максимальное увеличение HV при комплексной обработке составляет 4,7 раза, параметр k при комплексной обработке, независимо от режима, снижается в 18-20 раз, максимальное снижение μ составляет 1,5 раза.

7. Установлено, что воздействие интенсивного импульсного электронного пучка с параметрами 30-50 Дж/см², не зависимо от длительности импульсов (50 мкс., 150 мкс. или 200 мкс.) и химического состава сплава АК5М2 или АК10М2Н, приводит к растворению интерметаллидов и формированию на всей поверхности облучения ячеистой структуры (зерна Al) разделенной прослойками второй фазы (Si). Размеры ячеек колеблются в интервале 10-200 нм., размеры прослоек 10-20 нм., эти два фактора являются причиной повышенных трибологических свойств модифицированного слоя.

8. Обнаружено, что электровзрывное легирование сплава АК10М2Н сопровождается формированием высокопористого поверхностного слоя толщиной 50 – 150 мкм, характеризующегося неоднородностью в распределении легирующих элементов (кремния, иттрия и кислород), субмикро- и наноразмерной многофазной структурой, упрочняющими фазами которой являются частицы кремния, Y₂O₃, YSi₂ и Y₂Si₂O₇;

9. Комплексное модифицирование поверхности сплава АК10М2Н приводит к формированию протяженного поверхностного слоя, концентрация Ti и Y в котором зависит от режима обработки, и от расстояния до поверхности модифицирования. Структура модифицированного слоя менее пористая в сравнении с электровзрывным легированием и характеризуется многофазным субмикро- наноразмерным состоянием, размеры кристаллитов структуры изменяются в пределах от единиц до сотен нанометров.

10. Разработан способ управления деформационными характеристиками Al заключающийся в воздействии магнитным полем величиной 0,3 Тл. Предложены рациональные режимы электронно-ионно-плазменных воздействий, позволяющие значительно повысить (2-2,5 раза) срок службы деталей и узлов изготавливаемых из силуминов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 98 печатных работах, в том числе:

а) 2 монографии, в том числе 1 в международном издательстве Taylor & Francis Group: Home, Великобритания; 1 глава в монографии [2-3]:

1. Zaguliaev, D. Electron-Ion-Plasma Modification of a Hypoeutectoid Al-Si Alloy / D. Zaguliaev, V. Gromov, S. Konovalov, Yu. Ivanov. – Great Britain: Taylor & Francis Group: Home, 2020. – 268 p.

2. Загуляев, Д. В. Зависимости параметра и микроискажений кристаллической решетки и величины области когерентного рассеяния силуминов от плотности энергии пучка электронов / Д. В. Загуляев, Ю. А. Рубанникова, Ю. Ф. Иванов, С. В. Коновалов, В. Е. Громов, В. В. Шляров // В книге: Современные наноматериалы; под общ. ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2020. – С. 194–206.

3. Громов, В. Е. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой: монография / В. Е. Громов, Д. В. Загуляев, Ю. Ф. Иванов, С. В. Коновалов, С. А. Невский, В. Д. Сарычев, Е. А. Будовских, Ю. А. Рубанникова. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2020. – 285 с.

б) 36 статей [4-39] в научных реферируемых изданиях индексируемых международными реферативными базами данных Scopus и Web of Science:

4. Zaguliaev D.V. The effect of high-intensity electron beam on the crystal structure, phase composition, and properties of Al-Si alloys with different silicon content / D.V. Zaguliaev, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, V.V. Shlyarov, Yu.A. Rubannikova // Progress in Physics of Metals. – 2021. – Vol. 22. – No. 1. – P. 129-157.

5. Zaguliaev D. Effect of pulsed electron beam treatment on microstructure and functional properties of Al-5.4Si-1.3Cu alloy /D. Zaguliaev, Y. Ivanov, S. Konovalov, V. Shlyarov, D. Yakupov, A. Leonov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2021. – V. 488. – P. 23-29.

6. Zaguliaev D.V. Evolution of strength properties and defect sub-structure of the hypoeutectic A319.0 alloy irradiated by a pulsed electron beam and fractured under tensile stress / D.V. Zaguliaev, Yu.F. Ivanov, A.A. Klopotov, A.M. Ustinov, V.V. Shlyarov, D.F. Yakupov // Materialia. – 2021. – Vol. 20. – 8 p. – 101223.

7. Ivanov, Yu. F. Changes in surface structure and mechanical characteristics of Al–5 wt% Si alloy after irradiation by electron beam / Yu. F. Ivanov, D. V. Zaguliaev, A. M. Glezer, V. E. Gromov, A. A. Abaturova, A. A. Leonov, A. P. Semin, R. V. Sundeev // Materials Letters. – 2020. – Vol. 275. – 4 p. – 128105.

8. Zaguliaev, D. V. Analysis of Structure and Microhardness AlSi5Cu2 and AlSi10Cu2 Cast Alloys Subjected to Electron Beam Surface Melting / D. V. Zaguliaev, I. I. Chumachkov, Yu. F. Ivanov, A. A. Abaturova, A. M. Ustinov, A. P. Semin // Proceedings 2020. 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). September 14–26, 2020. – Tomsk, 2020. – P. 737–740.
9. Konovalov, S. Modification of Al-10Si-2Cu alloy surface by intensive pulsed electron beam / S. Konovalov, D. Zaguliaev, Y. Ivanov, V. Gromov, A. Abaturova // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9 (3). – P. 5591–5598.
10. Zaguliaev, D. Effect of electron-plasma treatment on the microstructure of Al-11wt%Si alloy / D. Zaguliaev, Yu. Ivanov, S. Konovalov, A. Abaturova, V. Gromov, Yu. Rubannikova, A. Semin // Materials Research. – 2020. – Vol. 23 (2). – 8 p. – e20200057.
11. Zaguliaev, D. Microstructure and Microhardness of Piston Alloy Al-10Si-2Cu Irradiated by Pulsed Electron Beam / D. Zaguliaev, S. Konovalov, Y. Ivanov, A. Abaturova, A. Leonov // Archives of foundry engineering. – 2020. – Vol. 20 (3/2020). – P. 92–98.
12. Zaguliaev, D. Structure and phase states modification of AL-11SI-2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam / D. Zaguliaev, V. Gromov, Yu. Rubannikova, S. Konovalov, Yu. Ivanov, D. Romanov, A. Semin // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 383. – 5 p. – 125246.
13. Ivanov, Yu. F. Prospects for the Application of Surface Treatment of Alloys by Electron Beams in State-of-the-Art Technologies / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zaguliaev, S. V. Konovalov, Yu. A. Rubannikova, A. P. Semin // Progress in Physics of Metals. – 2020. – Vol. 21 (3). – P. 345–362.
14. Zagulyaev, D. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals / D. Zagulyaev, S. Konovalov, V. Shlyarov, X. Chen // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6. – 8 p. – 096523.
15. Ivanov, Yu. F. Structural-phase state and the properties of silumin after electron-beam surface treatment / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, S. V. Konovalov, D. V. Zagulyaev, E. A. Petrikova // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – Vol. 4. – P. 398–402.
16. Gromov, V. Evolution of structure-phase states of hypoeutectic silumin irradiated by intensive pulse electron beams / V. Gromov, S. Konovalov, Y. Ivanov, D. Zaguliaev, E. Petrikova, Y. Serenkov // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6 (7). – 9 p. – 076574.
17. Konovalov, S. Dispersion of al-si alloy structure by intensive pulsed electron beam / S. Konovalov, V. Gromov, D. Zagulyaev, Y. Ivanov, A. Semin, J. Rubannikova // Archives of foundry engineering. – 2019. – Vol. 19 (2). – P. 79–84.
18. Ivanov, Yu. F. Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams / Yu. F. Ivanov, D. V. Zaguliaev, S. A. Nevskii, V. E. Gromov, V. D. Sarychev, A. P. Semin // Progress in Physics of Metals. – 2019. – Vol. 20 (3). – P. 447–484.
19. Zagulyaev, D. V. Effect of the density of electron beam energy on the structure and mechanical characteristics of surface layers of hypoeutectic silumin / D. V. Zagulyaev, Yu. F. Ivanov, A. M. Glezer, V. E. Gromov, S. V. Konovalov //

Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – Vol. 83. – No. 10 – P. 1282–1288.

20. Zaguliaev, D. V. Wear resistance of the surface layers in silumin after electron-beam treatment / D. V. Zaguliaev, V. E. Gromov, S. V. Konovalov, A. M. Glezer, S. V. Panin, Yu. F. Ivanov // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – Vol. 19 (10). – P. 23–27.

21. Petrikova, E. A. Microdiffraction analysis of structure of silumin's highvelocity cellular crystallization / E. A. Petrikova, A. D. Teresov, M. E. Rygina, O. S. Tolkachev, Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zagulyaev, S. V. Konovalov, A. P. Semin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1393. – 6 p. – 012114.

22. Zagulyaev, D. Research into morphology and phase structure in the surface of Al-Si alloy modified by yttrium oxide / D. Zagulyaev, S. Konovalov, V. Gromov, A. Melnikov, V. Shlyarov // Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences. – 2019. – Vol. 67 (1). – 5 p.

23. Zaguliaev, D. Effect of electron-plasma alloying on structure and mechanical properties of Al-Si alloy / D. Zaguliaev, S. Konovalov, Y. Ivanov, V. Gromov // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 498. – 7 p. – 143767.

24. Zagulyaev, D. V. Analysis of changes in structure and microhardness of Al-11Si-2Cu alloy after complex treatment / D. V. Zagulyaev, V. V. Shlyarov, V. E. Gromov, Yu. A. Rubannikova, A. P. Semin, A. D. Teresov // AIP Conference Proceedings – 2019. – Vol. 2167. – 4 p. – 020398.

25. Ivanov, Yu. F. Nanostructurisation of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying and subsequent electron beam processing / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zagulyaev, S. V. Konovalov, Yu. A. Rubannikova, A. P. Semin // International Journal of Nanotechnology. – 2019. – Vol. 16. – 619–628.

26. Ivanov, Yu. Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing / Yu. Ivanov, V. Gromov, D. Zaguliaev, A. Glezer, R. Sundeev, Y. Rubannikova, A. Semin // Materials Letters. – 2019. – Vol. 253. – P. 55–58.

27. Zaguliaev, D. Microstructure and mechanical properties of doped and electron-beam treated surface of hypereutectic Al-11.1%Si alloy / D. Zaguliaev, S. Konovalov, Yu. Ivanov, V. Gromov and E. Petrikova // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Vol. 8 (5). – P. 3835–3842.

28. Ivanov, Yu. F. Nanostructure formation of hypoeutectic silumin by electronion-plasma methods / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zagulyaev, S. V. Konovalov, Yu. A. Rubannikova, E. A. Petrikova, M. E. Rygina // Journal of Physics: Conference Series – 2019. Vol. 1393. – 5 p. – 012091.

29. Ivanov, Yu. F. The Structure and Properties of a Hypoeutectic Silumin Subjected to Complex Electron-Ion-Plasma Processing / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zaguliaev, S. V. Konovalov, Yu. A. Rubannikova, A. P. Semin // Progress in Physics of Metals. – 2019. – Vol. 20 (4). – P. 634–671.

30. Zaguliaev, D. V. Microstructure and micro-hardness behavior of Ti-Y₂O₃-Al-Si composite coatings prepared in electron-plasma alloying / D. V.

Zagulyaev, S. V. Konovalov, Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov // Materials Characterization. – 2019. – Vol. 158. – 6 p. – 109934.

31. Zagulyaev, D. V. Structure and properties changes of Al-Si alloy treated by pulsed electron beam / D. V. Zagulyaev, S. V. Konovalov, V. E. Gromov, A. M. Glezer, Yu. F. Ivanov, R. V. Sundeev // Materials Letters. – 2018. – Vol. 2209. – P. 377–380.

32. Ivanov, Yu. F. Modification of structure and surface properties of hypoeutectic silumin by intense pulse electron Beams / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, S. V. Konovalov, D. V. Zagulyaev, E. A. Petrikova, A. P. Semin // Progress in Physics of Metals. – 2018. – Vol. 19. – No. 2. – P. 195–222.

33. Zagulyaev, D. V. Gradient structure formation in the surface layer of AK10M2N silumin by electron beam treatment / D. V. Zagulyaev, V. E. Gromov, S. V. Konovalov, Yu. F. Ivanov, A. D. Teresov, Yu. S. Serenkov // AIP Conference Proceedings. – 2018. – No. 2051. – 5 p.

34. Gromov, V.E. A study on changes in the properties of silumin surface layers modified by yttrium oxide / V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, D. V. Zagulyaev, O. S. Tolkachev, E. A. Petrikova, S. V. Konovalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. – 5 p.

35. Konovalov, S. V. Effect of yttrium oxide modification of al-si alloy on microhardness and microstructure of surface layers / S. V. Konovalov, D. V. Zagulyaev, Y. F. Ivanov, V. E. Gromov // Metalurgija. – 2018. – No. 57 (4). – P. 253–256.

36. Osintsev, K. A. AFM investigation of silumin structure modified by Al-Y2O3 coating using the method of electric explosive alloying / K. A. Osintsev, K. A. Butakova, S. V. Konovalov, D. V. Zagulyaev, V. E. Gromov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411. – 8 p.

37. Zagulyaev, D. V. Study of the surface relief, structure and phase composition of the silumin composite layer obtained by the method of electric explosion alloying by Al-Y2O3 system / D. V. Zagulyaev, V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, E. A. Petrikova, A. D. Teresov, S. V. Konovalov, A. P. Semin // IOP Conference Series: Journal of Physics. – 2018. – Vol. 1115. – 7 p.

38. Konovalov, S. Variations in defect substructure and fracture surface of commercially pure aluminum under creep in weak magnetic field / S. Konovalov, D. Zagulyaev, X.-Z. Chen, V. Gromov, Y. Ivanov // Chinese Physics B. – 2017. – Vol. 26. – 5 p. – 126203.

39. Osintsev, K. Study on mechanical properties and structure of silumin after its surface modification with yttrium oxide / K. Osintsev, D. Zagulyaev, S. Konovalov, V. Shlyarov // AIP Conference Proceedings. – 2017. – No. 1909. – 4 p. – 020159.

в) 17 статей из перечня, рекомендованного ВАК РФ для опубликования результатов диссертационного исследования [40-56]:

40. Коновалов С.В. Структурные изменения поверхности сплава АК5М2 при воздействии интенсивного импульсного электронного пучка / С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, Д.В. Загуляев, Д.Ф. Якупов, А.М. Устинов,

Д.А. Косинов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2021. - № 2. - С. 94-101. DOI: 10.31857/S1028096021020084.

41. Шляров, В. В. Эволюция микроструктуры и микротвердости поршневого сплава Al-10Si-2Cu, облученного импульсным электронным пучком / В. В. Шляров, Д. В. Загуляев, А. А. Абатурова, А. А. Леонов, А. М. Устинов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2020. – Т. 17. – № 1. – С. 32–39.

42. Zagulyaev, D. V. Increase in wear resistance of the surface layers of AK10M2N silumin at electron-beam treatment / D. V. Zagulyaev, V. E. Gromov, S. V. Konovalov, Yu. F. Ivanov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Vol. 10 (3). – P. 622–628.

43. Ivanov, Yu. F. Formation of structure and properties of silumin on electron-beam processing / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, S. V. Konovalov, D. V. Zagulyaev, A. P. Semin // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – Vol. 13 (6). – P. 1040–1044.

44. Ivanov, Yu. F. Formation and evolution of structure and phase composition of hypoeutectoid silumin on electron beam processing / Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zagulyaev, S. V. Konovalov, A. P. Semin, Yu. A. Rubannikova // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – Vol. 13 (5). – P. 809–813

45. Gromov, V. E. Structural Phase State of Surface Alloyed Y2O3 Silumin After Electron beam Processing / V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, D. V. Zagulyaev, E. A. Perikova, A. D. Teresov, Yu. A. Rubannikova, A. P. Semin // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques – 2019. – Vol. 13 (6). – P. 1343–1349.

46. Загуляев, Д. В. Влияние плотности энергии пучка электронов на структуру и механические характеристики поверхностных слоев доэвтектического силумина / Д. В. Загуляев, Ю. Ф. Иванов, А. М. Глезер, В. Е. Громов, С. В. Коновалов // Известия РАН. Серия Физическая. – 2019. – Т. 83. – № 10. – С. 1402–1409.

47. Шляров, В.В. Влияние магнитных полей на процесс пластической деформации цветных металлов / В.В. Шляров, Д.В. Загуляев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 394-398.

48. Громов, В. Е. Комплексная электронно-ионно-плазменная обработка доэвтектического силумина: структура и свойства поверхности / В. Е. Громов, Д. В. Загуляев, Ю. А. Рубанникова, Е. А. Петрикова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 411–419.

49. Громов, В. Е. Эволюция структуры и свойств силумина АК10М2Н, облученного интенсивным импульсным электронным пучком / В. Е. Громов, И. Ф. Иванов, Д. В. Загуляев, Е. А. Петрикова, С. В. Коновалов, А. Д. Тересов, М. Е. Рыгина // Неорганические материалы. – 2018. – Т. 54. – № 12. – С. 1308–1314.

50. Загуляев, Д. В. Исследование износостойкости поверхностных слоев силумина после электронно-пучковой обработки / Д. В. Загуляев, В. Е.

Громов, С. В. Коновалов, А. М. Глезер, С. В. Панин, Ю. Ф. Иванов // Деформация и разрушение материалов. – 2018. – № 12. – С. 23–27.

51. Загуляев, В. Е. Повышение износостойкости поверхностных слоев силумина АК10М2Н путем электронно-пучковой обработки / Д. В. Загуляев, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов // Физика и химия обработки материалов. – 2018. – № 5. – С. 31–40.

52. Иванов, Ю. Ф. Структурно-фазовое состояние и свойства поверхности силумина после электронно-пучковой обработки / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Д. В. Загуляев, Е. А. Петрикова // Деформация и разрушения материалов. – 2018. – № 10. – С. 17–21.

53. Загуляев, Д. В. Изучение изменений структуры и свойств поверхности эвтектического силумина, подвергнутого модифицированию оксидом иттрия / Д. В. Загуляев, С. В. Коновалов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, О. С. Толкачев, Е. А. Петрикова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 10/2. – С. 49–53.

54. Петрунин, В.А. Физические аспекты влияния слабых магнитных полей на деформационное поведение Al / В.А. Петрунин, Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, В.Я. Целлермаер // Известия Алтайского государственного университета. Серия Физика. – 2012. – №1/2(73). – С.150 – 153.

55. Загуляев, Д.В. Изменение микротвердости алюминия разной чистоты в слабых магнитных полях / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, В.Я. Целлермаер // Цветные металлы. – 2012. – №9. – С. 85-89.

56. Загуляев, Д.В. Особенности дислокационной структуры алюминия, формирующейся при ползучести в магнитном поле / Д.В. Загуляев, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 5. – С.8-12.

г) 6 патентов на изобретение РФ [57-62] и 7 свидетельств о государственной регистрации базы данных [63-69]:

57. Пат. № 2762446 РФ. МПК C22F 1/043; C22F 3/02. Способ обработки поверхностного слоя силумина АК5М2 / К. В. Аксенова, Д. В. Загуляев, Д.Ф. Якупов, А.А. Абатурова, В.Е. Громов; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», ФГБОУ ВО «СибГИУ». – № 2021116381, заявл. 04.06.2021; опубл. 21.12.2021. Бюл. № 36.

58. Пат. № 2753845 РФ. МПК C22F 3/02. Способ обработки заготовок из технически чистого титана BT1-0 / Д. В. Загуляев, В. В. Шляров; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», ФГБОУ ВО «СибГИУ». – № 2021104946, заявл. 25.02.2021; опубл. 24.08.2021. Бюл. № 24.

59. Пат. № 2727376 РФ. МПК C23C 4/04, C23C 4/134, C23C 4/18, C22F 3/00. Способ нанесения износостойких покрытий на основе алюминия и оксида иттрия на силумин / Д. В. Загуляев, К. А. Бутакова, С. В. Коновалов,

В. Е. Громов; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2020100813, заявл. 09.01.2020; опубл. 21.07.2020 Бюл. № 21.

60. Пат. 2676122 РФ. МПК C23C 4/10, C23C 4/12. Способ нанесения износостойких покрытий на основе алюминия и оксида иттрия на силумин / Д. В. Загуляев, К. А. Осинцев, С. В. Коновалов, В. Е. Громов, Д. А. Романов; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2018119044, заявл. 23.05.2018; опубл. 26.12.2018. Бюл. № 36.

61. Пат. № 2497617 РФ. МПК B21C 1/00 (2006.01). Способ волочения алюминиевой проволоки / Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Комиссарова И.А., Громов В.Е; Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2012110451/02, заявл. 19.03.2012; опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31.

62. Пат. № 2502825 РФ. МПК C22F 3/02(2006.01), C22F 1/04(2006.01). Способ регулирования долговечности изделия из алюминия, работающего в условиях ползучести/ Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Комиссарова И.А., Громов В.Е; Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2012119810/02, заявл. 14.05.2012; опубл. 10.11.2013. Бюл. № 36.

63. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620992 Российская Федерация. Экспериментальные данные, полученные в процессе растяжения сплава АК5М2, находящегося в литом состоянии и после электронно-пучковой обработки в различных режимах / Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А., Якупов Д.Ф., Громов В.Е.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2021620860; заявл. 28.04.2021; зарегистр. 18.05.2021.

64. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620425 Российская Федерация. Механические свойства сплавов АК5М2 и АК10М2Н, подвергнутых электронно-пучковой обработке в различных режимах / Рубанникова Ю.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Громов В.В., Иванов Ю.Ф.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2021620314; заявл. 25.02.2021; зарегистр. 05.03.2021.

65. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020621872. Российская Федерация. Характеристики силуминов АК5М2 и АК10М2Н после облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком с различными параметрами // К. В. Аксенова, Д. В. Загуляев, В. Е. Громов, Д. Ф. Якупов, Ю. А. Рубанникова, А. А. Абатурова; правообладатель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». – № 2020621722. заявл. 01.10.2020; зарегистр. 14.10.2020 Бюл. № 10.

66. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621504. Российская Федерация. Механические характеристики сплава АК10М2Н, обработанного электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 15 и 35 Дж/см² / К. А. Бутакова, К. А. Осинцев, В. В. Шляров, Д. В. Загуляев, С. В. Коновалов, В. Е. Громов; правообладатель Сиб.гос.индустр.ун-т. – № 2019621363. заявл. 06.08.2019; зарегистр. 26.08.2019 – 1с.

67. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621238. Российская Федерация. Изменение микротвердости силумина АК10М2Н при комбинированной обработке с оптимальными параметрами / В. В. Шляров, К. А. Бутакова, Д. В. Загуляев, В.Е. Громов, С.В. Коновалов; правообладатель Сиб.гос.индустр.ун-т. – № 2019621167. заявл. 02.07.2019; зарегистр. 11.07.2019 – 1с.

68. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018620798. Российская Федерация. Изменение микротвердости в силумине АК10М2Н, подвергнутого облучению высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия с плотностью энергии пучка электронов $E_s = 25$ Дж/см² / К. А. Осинцев, К. А. Бутакова, С. В. Коновалов, Д. В. Загуляев, В. В. Шляров, В. Е. Громов; правообладатель Сиб.гос.индустр.ун-т. – № 2018620459. заявл. 18.04.2018; зарегистр. 04.06.2018. Бюл. № 6.

69. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018620368. Российская Федерация. Изменение микротвердости АК10М2Н, обработанного порошком Y₂O₃, массой 0,0589 г и энергией воздействия 2,6 кВ, при электровзрывном легировании / К. А. Осинцев, К. А. Бутакова, С. В. Коновалов, Д. В. Загуляев, В. В. Шляров, В. Е. Громов; правообладатель Сиб.гос.индустр.ун-т. – № 2017621349. заявл. 22.11.2017; зарегистр. 01.03.2018 Бюл. № 3.

Подписано в печать 08 июня 2022 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная

Усл. печ. л. 2,16 Уч. изд. л. 2,40 Тираж 120 экз. Заказ 156

Сибирский государственный индустриальный университет.

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Издательский центр СибГИУ