



Шлярова Юлия Андреевна

**УПРОЧНЕНИЕ ВЫСОКОКРЕМНИСТЫХ СИЛУМИНОВ ПЛАЗМОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-
ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Улан-Удэ – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный
руководитель доктор технических наук,
Загуляев Дмитрий Валерьевич

Официальные
оппоненты: Иванов Константин Вениаминович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики консолидации порошковых материалов, ведущий научный сотрудник

Назаров Алмаз Юнирович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», кафедра технологии машиностроения, доцент

Ведущая
организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится «09» декабря 2025 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.463.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института монголоведения, буддологии и тибетологии Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте ИФМ СО РАН: www.ipms.bscnet.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м. н.



Зеленая А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное развитие науки и техники ставит задачу экономии ресурсов и повышения качества продукции, что возможно благодаря внедрению инновационных материалов и технологий. Особое внимание уделяется алюминий-кремниевым сплавам (силуминам), которые благодаря своей легкости, прочности, коррозионной стойкости и экономичности находят широкое применение в промышленности. Использование таких сплавов позволяет существенно снижать удельный расход материалов и потребление энергии, что особенно важно для современного машиностроения.

Силумины обладают рядом уникальных свойств, включая высокую литейную текучесть, термическую стабильность, малую усадку и отличные антифрикционные характеристики. Эти преимущества делают их незаменимыми в производстве деталей для автомобилестроения, авиастроения и других отраслей. Однако, несмотря на их достоинства, недостатки, такие как низкая твердость и износостойкость, требуют разработки новых методов улучшения их эксплуатационных характеристик.

Современные исследования сосредоточены на улучшении состава и качества поверхностных слоев алюминиевых сплавов. Наиболее перспективным направлением является комбинированное использование методов электровзрывного легирования и обработки высокоинтенсивными импульсными электронными пучками. Эти технологии позволяют значительно повысить износостойкость, прочность и долговечность изделий, обеспечивая их соответствие современным требованиям промышленности. В связи с вышеизложенным представленная работа является актуальной, поскольку в ней рассмотрена двухэтапная обработка материала.

Степень разработанности темы. В настоящее время модификация алюминиевых сплавов – один из наиболее активно исследуемых вопросов как в российской, так и зарубежной науке. Особый интерес представляет применение современных технологий, которые позволяют значительно улучшать структуру и свойства этих материалов. Среди ведущих исследователей этой области можно отметить: М.В. Мальцева, А.В. Рожина, В.К. Афанасьева, А.Н. Прудникова, В.Б. Деева, Е.С. Прусова, Е.С. Лопатину, J. Borowski, J. Qian, Y. Yin, R.S. Rajamure, H.D. Vora, K.G. Prashanth, L. Xi, P. Wang, H. Li, H.V. Prykhodko и др.

Значительный прогресс в области модификации металлов и сплавов достигнут благодаря использованию различных методов обработки поверхности, таких как плазменная обработка, лазерная и электронно-лучевая обработка, ионная имплантация, электродуговая и лазерная наплавка, воздействие электронными и ионными пучками, а также их комбинации. Метод электрического взрыва проводников позволяет эффективно насыщать поверхностный слой металлов и сплавов легирующими элементами и формировать новые структурно-фазовые состояния. Наиболее весомый вклад в исследования по электровзрывному легированию внесли Д.А. Романов и Е.А.

Будовских, которые установили важные закономерности упрочнения различных металлических материалов.

Электронно-пучковая обработка позволяет получать нанокompозитные структуры и существенно повышать микротвердость поверхностного слоя материала. Воздействие высокоинтенсивными импульсными электронными пучками способствует формированию более однородного покрытия с улучшенными физико-механическими свойствами. Это достигается благодаря проплавлению поверхностных слоев и последующей высокоскоростной кристаллизации материала. Ведущими российскими исследователями в этой области являются Ю.Ф. Иванов, А.А. Клопотов, А.Д. Тересов, В.В. Шугуров, Л.Л. Мейснер, В.И. Энгелько, В.А. Шулов, а также зарубежные ученые, такие как B. Gao, Y. Zhang, L. Hu, S. Li и др.

В последние годы активно развиваются комплексные или двухэтапные методы обработки, сочетающие электровзрывное легирование с последующей электронно-пучковой или плазменной обработкой. Благодаря этому формируются нанокompозитные структурно-фазовые состояния, что позволяет существенно повышать твердость и эксплуатационные характеристики алюминиевых и других металлических материалов. Вклад в развитие комбинированных методов внесли В.Е. Громов, С.В. Коновалов, А.М. Жукешов, В.И. Калита, С. Zhang, С. Chen, М. Zuo, D. Zhao, X. Teng и др., которые подтвердили эффективность комплексного подхода для упрочнения как цветных, так и черных металлов.

Целью работы является установление закономерностей формирования структурно-фазовых состояний и изменение микротвердости сплавов системы Al-Si (доэвтектического и заэвтектического состава), подвергнутых двухэтапной обработке, включающей электровзрывное легирование оксидом иттрия, с последующим облучением электронным пучком.

Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

- 1) разработать способ двухэтапной обработки поверхности силуминов, включающий электровзрывное легирование оксидом иттрия, а также последующую электронно-пучковую обработку зоны легирования;
- 2) определить влияние двухэтапной обработки на структуру и фазовый состав зоны упрочнения;
- 3) измерить микротвердость поверхности сплавов Al-11%Si и Al-20%Si после электровзрывного легирования оксидом иттрия и последующей электронно-пучковой обработки при различных режимах;
- 4) провести послойное исследование структуры модифицированного слоя методом просвечивающей электронной микроскопии, а также установить физические механизмы формирования упрочненной зоны.

Научная новизна. Впервые обнаружено, что на поверхности силуминов, обработанных методом электровзрывного легирования с использованием оксида иттрия, формируется характерное покрытие, которое при последующей электронно-пучковой обработке образует единую зону упрочнения. В ходе исследования были тщательно изучены морфология структурных составляющих

и элементный состав, присутствующие в поверхностном слое силуминов, обработанных электровзрывным легированием оксидом иттрия, и выяснилось, что последующее применение электронно-пучковой обработки приводит к заметной дисперсии структуры и переходу в состояние нано- и субмикронного масштаба. Кроме того, данное исследование является новаторским в своем подходе, поскольку оно позволило провести всесторонний количественный и качественный анализ структурных и фазовых состояний поверхностных слоев силумина (доэвтектического и заэвтектического состава) в процессах электровзрывного легирования оксидом иттрия с последующим применением электронно-пучковой обработки. Таким образом, результаты этой диссертационной работы не только подчеркивают сложные взаимодействия между материалами и процессами обработки, но и открывают путь к будущим исследованиям, направленным на изучение всего потенциала силуминов в передовых областях применения.

Теоретическая и практическая значимость работы этого исследования заключается в улучшении понимания физических механизмов формирования структур и фазового состава алюминиевых сплавов Al-Si (как доэвтектических, так и заэвтектических типов) после двухэтапной обработки. Выявлен характер изменения структуры, фазового состава и микротвердости силуминов Al-11%Si и Al-20%Si.

Эмпирические данные, полученные в результате диссертационного исследования, имеют значительный потенциал для развития теоретических основ структурно-фазовых превращений, особенно в контексте алюминиевых сплавов. Основные положения, сформулированные в диссертационной работе, имеют значительную образовательную ценность и могут быть успешно использованы при подготовке лекционных курсов по физике конденсированного состояния, физическому материаловедению, металловедению и термообработке. Кроме того, результаты, представленные в диссертационной работе, были тщательно проанализированы и изучены в ходе научных исследований, проведенных в Сибирском государственном индустриальном университете. Полученные в диссертационной работе результаты нашли широкое применение в образовательном процессе, способствуя развитию профессиональных знаний и практических навыков у бакалавров, магистров и аспирантов по направлению «Материаловедение и технология материалов», «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», «Материаловедение», «Физика конденсированного состояния». Практическая значимость работы подтверждена актами внедрения ее результатов в промышленности.

Методология и методы исследования. Методологическая основа настоящего исследования заключается в предположении, что характеристики поверхностных слоев материалов определяются их специфическим химическим составом и особенностями строения, которые формируются в результате воздействия различных технологических режимов и методов обработки. На формирование данных параметров оказывает существенное влияние как природа исходного материала, так и используемые условия обработки.

Модифицирование поверхности осуществлялось в два этапа: 1. Электровзрывное легирование оксидом иттрия на электроразрядной установке ЭВУ 60/10 (ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк); 2. Облучение интенсивным импульсным электронным пучком в различных режимах, производили с помощью установки «СОЛО» (ИСЭ СО РАН, г. Томск).

Для реализации цели и решения задач диссертационной работы был применен широкий спектр современных методов физического материаловедения, включая оптическую микроскопию, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ, а также измерение микротвердости. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием следующих приборов: оптический микроскоп Olympus GX-51, рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, сканирующий электронный микроскоп Philips SEM 515, просвечивающий электронный микроскоп JEOL JEM 2100F, микротвердомеры ПМТ-3 и HVS-1000A.

Положения, выносимые на защиту:

1. Изменение микротвердости в силуминах Al-11%Si и Al-20%Si показало, что применение электровзрывного легирования порошком оксида иттрия (Y_2O_3) обеспечивает формирование упрочненного поверхностного слоя с неравномерным распределением микротвердости: максимальные значения микротвердости наблюдаются в приповерхностной зоне толщиной до 100 мкм, с последующим плавным снижением к исходным значениям в объеме сплава.

2. Формирование структуры ячеистой кристаллизации с размером ячеек 0,5-1,3 мкм, разделенных прослойками второй фазы (Si) размером 40-80 нм, для силуминов Al-11%Si и Al-20%Si после двухэтапной обработки, сочетающей электровзрывное легирование с последующей электронно-пучковой обработкой.

3. Физическая природа повышения механических свойств поверхности алюминиевых сплавов Al-11%Si и Al-20%Si при двухэтапной обработке заключается в измельчении структуры, формировании частиц субмикро- и наноразмерного диапазона и образовании вторых фаз (SiY , YAl_3 , $Y_2Si_2O_7$, Si).

4. Особенности послойного строения поверхностей, сформированных при электровзрывном легировании с последующим электронно-пучковым облучением. Для силумина Al-11%Si в тройных стыках структуры ячеистой кристаллизации выявлено формирование включений второй фазы – SiY , имеющих ограниченную форму. Для силумина Al-20%Si в поверхностном слое толщиной до 1 мкм и в переходном слое толщиной до 40 мкм формируются включения второй фазы – YAl_3 , $Y_2Si_2O_7$ и Si, обладающие глобулярной формой.

Достоверность результатов работы. Достоверность экспериментальных результатов и обоснованность выводов в основном зависят от глубокого определения четко сформулированных задач исследования, комплексного подхода к их решению с использованием современных методов и методик, значительного объема эмпирических данных, собранных в ходе экспериментов, обширного обзора и анализа существующей литературы по данной теме, а также критического сопоставления закономерностей и тенденций, выявленных в рамках текущего исследования, с эмпирическими данными и выводами других

ученых в этой области, что способствовало созданию надежной основы для подтверждения достоверности проведенного исследования.

Личный вклад автора прежде всего состоит во всестороннем анализе существующей литературы по данной теме, тщательном планировании и выполнении ряда экспериментов, включая, процесс нанесения покрытий, проведение точных измерений микротвердости, а также применение передовых аналитических методов, таких как просвечивающая электронная микроскопия и сканирующая электронная микроскопия. А также последующий анализ полученных в результате этих экспериментальных исследований данных, который в конечном итоге приводит к написанию научных статей и тезисов и формулировке основных выводов и основных положений, необходимых для последующей защиты результатов исследования.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, чтениях, семинарах и школах: «SMMIB–2019. 21-st International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams», Томск, 2019; Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 2019; X Ежегодная конференция Нанотехнологического общества России, Москва, 2019; XLV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения-2019», Москва, 2019; Одиннадцатая Международная Конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов», памяти академика Г.В. Курдюмова, Черноголовка, 2020; LXIV Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», Екатеринбург, 2022; 11th International online symposium on materials in external fields (ISMEF 2022), Novokuznetsk, 2022; Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения», Томск, 2022; Международная конференция «Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения», Томск, 2022; Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», Витебск, 2022; XII Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов», Черноголовка, 2022; III Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур», Казань, 2022; III Международная конференция, посвященная 60-летию ИФТТ РАН «Физика конденсированных состояний», Черноголовка, 2023; XII Международный онлайн-симпозиум «Материалы во внешних полях (МВП–2023)», Новокузнецк, 2023; XIII Международный онлайн-симпозиум «Материалы во внешних полях (МВП–2024)», Новокузнецк, 2024; Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», Новокузнецк, 2024; Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», Москва, 2024.

Публикации по теме диссертации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 29 научных работах, включая: 8 статей в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации

результатов диссертационных исследований; 12 статей, проиндексированных в международных базах данных Web of Science и Scopus; 1 монографию; 3 главы в коллективных монографиях; 5 докладов и тезисов, представленных на конференциях различного уровня и других научных мероприятиях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа по своему содержанию, поставленной цели и задачам, методикам исследования и научной новизне соответствует п. 3. «Экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ» и п. 6 «Установление закономерностей влияния технологии получения и обработки материалов на их структуру, механические, химические и физические свойства, а также технологические свойства изделий, предназначенных для использования в различных областях промышленности и медицины» паспорта специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов и приложения, списка литературы из 175 наименований. Диссертационная работа изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 12 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 первой главе «Способы модификации поверхностных слоев материалов» приведен обзор статей в зарубежных и российских научных журналах, монографий и патентов по тематике исследуемой проблемы. Рассмотрены такие виды воздействий как лазерное напыление, электронно-лучевая, электродуговая и лазерная наплавка, высокоинтенсивные электронные и мощные ионные пучки, комбинирование различных методов внешнего энергетического воздействия, а также влияние легирования иттрием на структуру и свойства сплавов. 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 второй главе «Оборудование, материалы и методики исследований» приводится обоснование необходимости выбора в качестве материалов для исследования сплавов системы Al-Si (доэвтектического и заэвтектического состава). Приводится химический состав исследованных сплавов, описываются форма и размеры образцов для исследований и их пробоподготовка. Химический состав определяли методами рентгеноструктурного анализа (прибор Shimadzu XRF-1800). Образцы имели форму параллелепипеда с размерами

20x20x10 мм³. Рассматриваются методы и методики металлографического анализа. Структуру модифицированного слоя поперечного шлифа анализировали методами оптической микроскопии (микроскоп Olympus GX-51). Исследования микротвердости (метод Викерса) материалов осуществлялись на микротвердомере HVS1000, оснащённом автоматическим устройством приложения нагрузки и вводом изображений полученных отпечатков в компьютер. Рассмотрены методы анализа тонкой структуры, просвечивающая и сканирующая электронные микроскопии, методики приготовления фольг для анализа методами просвечивающей электронной микроскопии. Показаны марки и модели используемого для исследований оборудования.

Описываются методики двухэтапной обработки поверхности материалов, включающие два последовательно выполняемых этапа. Первый этап заключался в нанесении композиционного покрытия системы Al-Y₂O₃ методом электрического взрыва на аппарате ЭВУ 60/10. В работе представлена схема лабораторной установки, и описаны процессы, происходящие внутри технологической камеры электровзрывной установки при формировании многофазных покрытий. Второй этап заключается в модифицировании поверхности сплавов методом электронно-пучковой обработки с использованием установки «СОЛО». Также представлены режимы электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки.

Для метода электровзрывного легирования были определены два оптимальных режима воздействия. Установленные оптимальные режимы были использованы для двухэтапного модифицирования сплавов. Режимы электровзрывного легирования и последующее облучение сплава приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы двухэтапной обработки силуминов Al-11%Si и Al-20%Si

№ режима	Масса алюминия фольги, m _{Al} (мг)	Масса порошка Y ₂ O ₃ , m _{Y₂O₃} (мг)	Напряжение разряда, U (кВ)	Плотность энергии пучка электронов, Дж/см ²	Энергия ускоренных электронов, кэВ	Длительность импульса пучка электронов, мкс	Количество импульсов тока	Частота следования импульсов, с ⁻¹
1	58,9	88,3	2,6	25	17	150	3	0,3
2	58,9	58,9	2,8	35				

В третьей главе «Исследование изменения микротвердости силуминов Al-11%Si и Al-20%Si» представлены результаты изменения микротвердости в зависимости от способа и режима модификации.

В результате тщательных исследований установлено, что процесс электровзрывного легирования оксидом иттрия приводит к значительному улучшению микротвердости сплавов. Обнаружено, что при исследовании микротвердости Al-11%Si сплава, максимальная микротвердость сосредоточена

в поверхностном слое, что значительно превосходит измерения микротвердости исходного материала более чем в 2,5 раза. Аналогичным образом, Al-20%Si сплав также продемонстрировал впечатляющие значения микротвердости после электровзрывного легирования. Микротвердость поверхностного слоя сплава Al-20%Si более чем в 2 раза превышает микротвердость исходного материала, что свидетельствует о существенном улучшении его структурной целостности. По мере удаления от поверхности модифицирования, становится очевидным, что микротвердость сплавов Al-11%Si и Al-20%Si имеет тенденцию постепенно уменьшаться и в конечном итоге приближается к уровням микротвердости исходного силуминового материала на глубине около 50 мкм. Кроме того, установлено, что использование двухэтапной обработки с энергией электронного пучка - 25 Дж/см², приводит к увеличению микротвердости примерно в 3,1 раза, а при 35 Дж/см² наблюдается резкое увеличение микротвердости примерно в 4,3 раза по сравнению с электровзрывным легированием для сплава Al-11%Si. Однако следует отметить, что в случае силумина Al-20%Si, после двухэтапной обработки регистрируется снижение микротвердости независимо от применяемого режима обработки (рисунок 1).

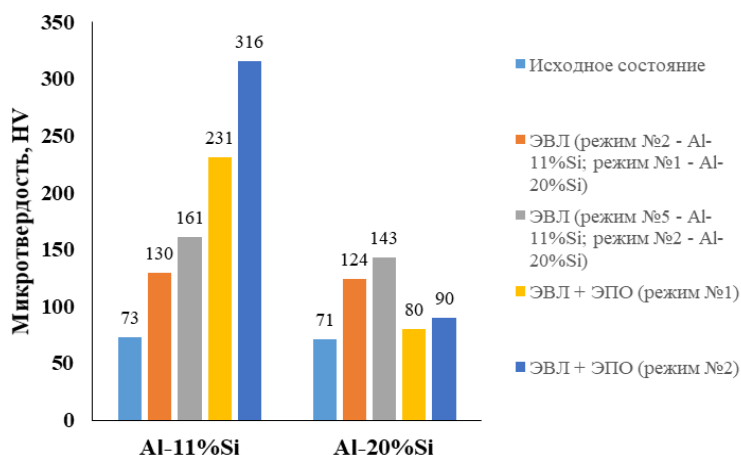


Рисунок 1 – Микротвердость поверхности силуминов Al-11%Si и Al-20%Si в зависимости от способа модификации

В четвертой главе «Структурно-фазовые состояния силуминов Al-11%Si и Al-20%Si в исходном состоянии и после электровзрывного легирования» представлены результаты исследования структурно-фазовых состояний силуминов Al-11%Si и Al-20%Si в исходном состоянии и после электровзрывного легирования системой Al-Y₂O₃.

Перед проведением электровзрывного легирования была исследована структура силуминов Al-11%Si и Al-20%Si в исходном состоянии. По результатам металлографического анализа установлено, что доэвтектический алюминиевый сплав с содержанием кремния 11 % состоит в основном из зерен твердого раствора алюминия (область 1 на рисунке 2). Эвтектические зерна преимущественно располагаются вдоль границ этих зерен и в точках пересечения границ алюминиевых зерен (область 2 на рисунке 2). Размер зерен алюминия сильно варьируется – от 25 мкм до 100 мкм, тогда как эвтектические

зерна имеют более стабильные размеры, находясь в диапазоне от 10 мкм до 30 мкм.

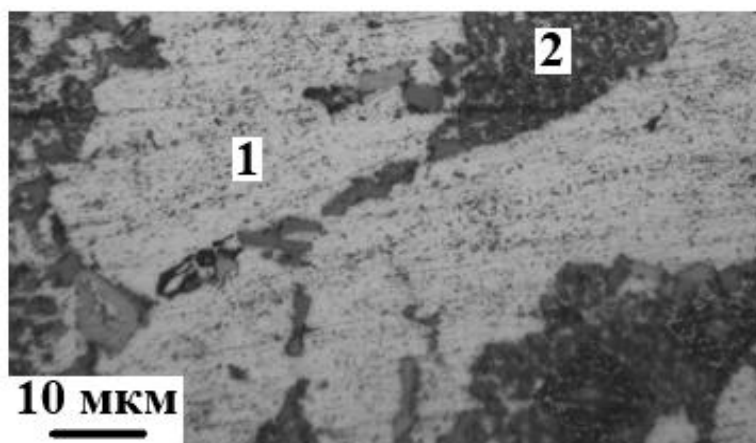


Рисунок 2 – Структура сплава Al-11%Si, выявленная методами оптической микроскопии

Металлографическое исследование структурного состава заэвтектического алюминиевого сплава Al-20%Si в исходном состоянии, показало, что структура имеет грубую игольчатую структуру, состоящую из эвтектики (α +Si) и первичных кристаллов кремния (рисунок 3).

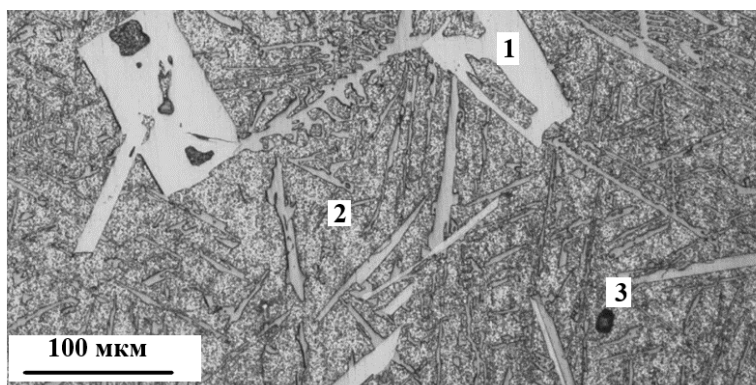


Рисунок 3 – Структура сплава Al-20%Si в исходном состоянии

Используя методы оптической микроскопии, было замечено, что структурные характеристики Al-20%Si сплава в литом виде в основном определяются присутствием первичных кремниевых включений, которые имеют преимущественно пластинчатую морфологию и размеры которых могут достигать 120 мкм (рисунок 3, область 1). В сочетании с этими кремниевыми пластинами также было обнаружено присутствие эвтектических образований, как показано на рисунке 3, область 2. Однако необходимо отметить, что одним из существенных недостатков литого заэвтектического сплава Al-20%Si является неизбежное появление пор микронного и субмикронного размера, изображенных на рисунке 3, область 3.

Методами металлографического анализа исследована структура профиля поверхности силуминов Al-11%Si и Al-20%Si. Было установлено, что для

силуминов Al-11%Si и Al-20%Si электровзрывное легирование приводит к формированию многослойной структуры, которая состоит из высокопористого покрытия, неоднородного по толщине (рисунок 4).

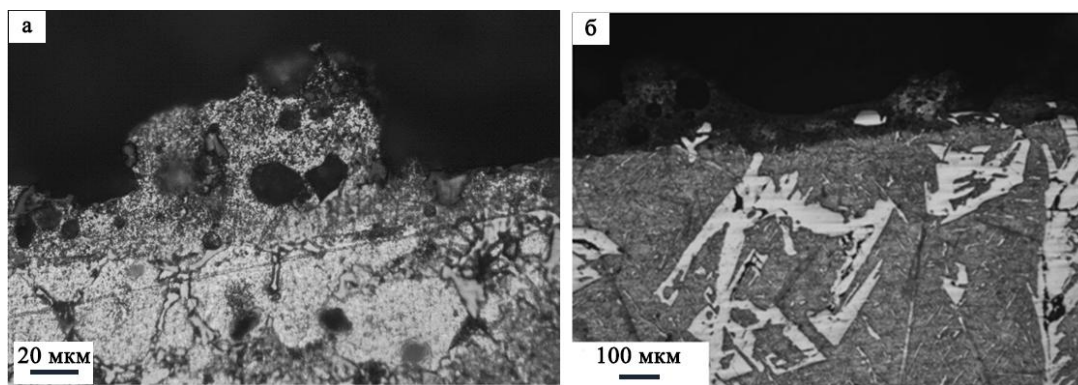


Рисунок 4 – Оптическая микроскопия профиля поверхности образцов силумина Al-11%Si (а) и Al-20%Si (б)

Установлено, что электровзрывное легирование системой Al- Y_2O_3 сопровождается формированием высокопористого поверхностного слоя толщиной 17-117 мкм для силумина Al-11%Si и 30-200 мкм для силумина Al-20%Si. В результате обширных исследований было установлено, что силумин, сложный металлический сплав, состоящий в основном из алюминия и кремния, характеризуется своей многофазной структурой, которая включает не только фазы твердого раствора, образующиеся в результате слияния алюминия и кремния, но и широкий спектр интерметаллических соединений, обладающих различным составом и структурными свойствами. Кремний и интерметаллические частицы, присутствующие в этом сплаве, имеют множество геометрических конфигураций (глобулярную, пластинчатую, игольчатую), и это разнообразие морфологии значительно, поскольку оно способствует не только повышению механической прочности материала, но и создает потенциальные проблемы, такие как образование микротрещин при использовании изделий из этого сплава.

В пятой главе «Изменения структурно-фазовых состояний и свойств поверхностных слоев силуминов Al-11%Si и Al-20%Si после двухэтапной обработки» представлены результаты исследований структурно-фазовых состояний силуминов Al-11%Si и Al-20%Si после двухэтапной обработки. Выполнен послойный анализ структуры, фазового состава поверхности силуминов после двухэтапной обработки.

Двухэтапная обработка сплава Al-11%Si по режиму 1 приводит к формированию многоэлементного многофазного слоя толщиной ≈ 80 мкм, имеющий субмикро-нанокристаллическое строение. В результате обработки формируется поверхность, содержащая микрократеры, микрокапли и пленочные образования (рисунок 5, а). Образующийся поверхностный слой имеет субмикрокристаллическое строение; размеры кристаллитов не превышают 1 мкм (рисунок 5, б). Анализ структуры травленных поперечных

шлифов показал, что толщина модифицированного, в результате двухэтапной обработки, слоя составляет (70-80) мкм (рисунок 5, в).

Элементный состав, морфологию фаз, состояние дефектной субструктуры силумина на разном расстоянии от поверхности обработки, изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии.

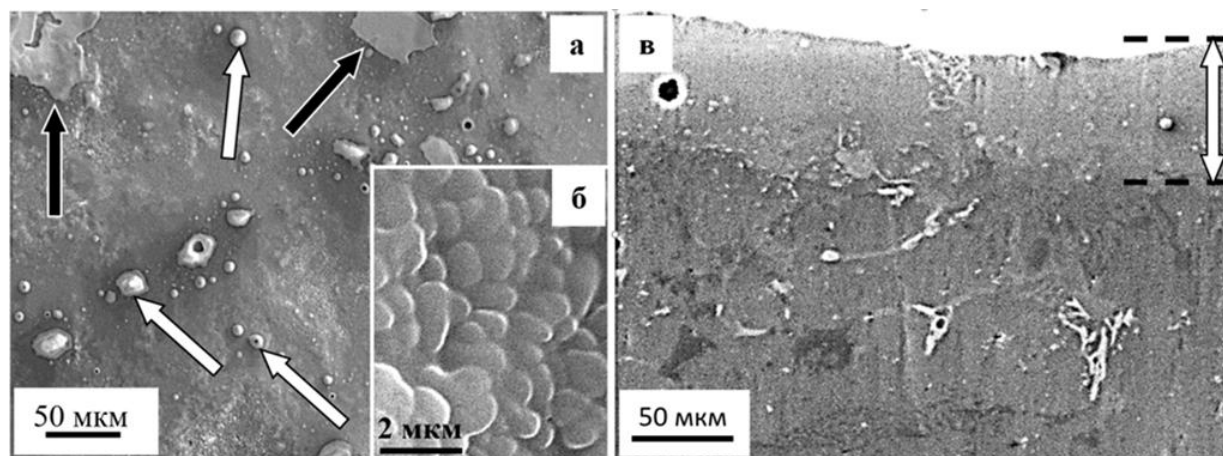


Рисунок 5 – Структура силумина Al-11%Si, подвергнутого двухэтапной обработке: а, б – структура поверхности облучения; в – структура поперечного травленого шлифа. На (а) темными стрелками указаны пленки, светлыми стрелками – микрокапли, расположенные на поверхности образца; на (в) – модифицированный слой

На рисунке 6 показано характерное изображение структуры ячеистой кристаллизации, которая формируется в слое толщиной до 80 мкм, размеры ячеек изменяются $\sim 0,8-1,3$ мкм, они разделены прослойками второй фазы размером 50-75 нм. В тройных стыках границ ячеек можно наблюдать включения второй фазы, имеющие ограниченную форму, характеризующиеся либо кубовидной конфигурацией, либо четырехлепестковыми розетками. Размеры этих включений колеблются в диапазоне (0,5-0,7) мкм. Следовательно, применение двухэтапной обработки в режиме 1 приводит к образованию поверхностного слоя, в котором количество включений второй фазы значительно уменьшается и на несколько порядков (в десятки и сотни раз) меньше, чем в материале в литом состоянии.

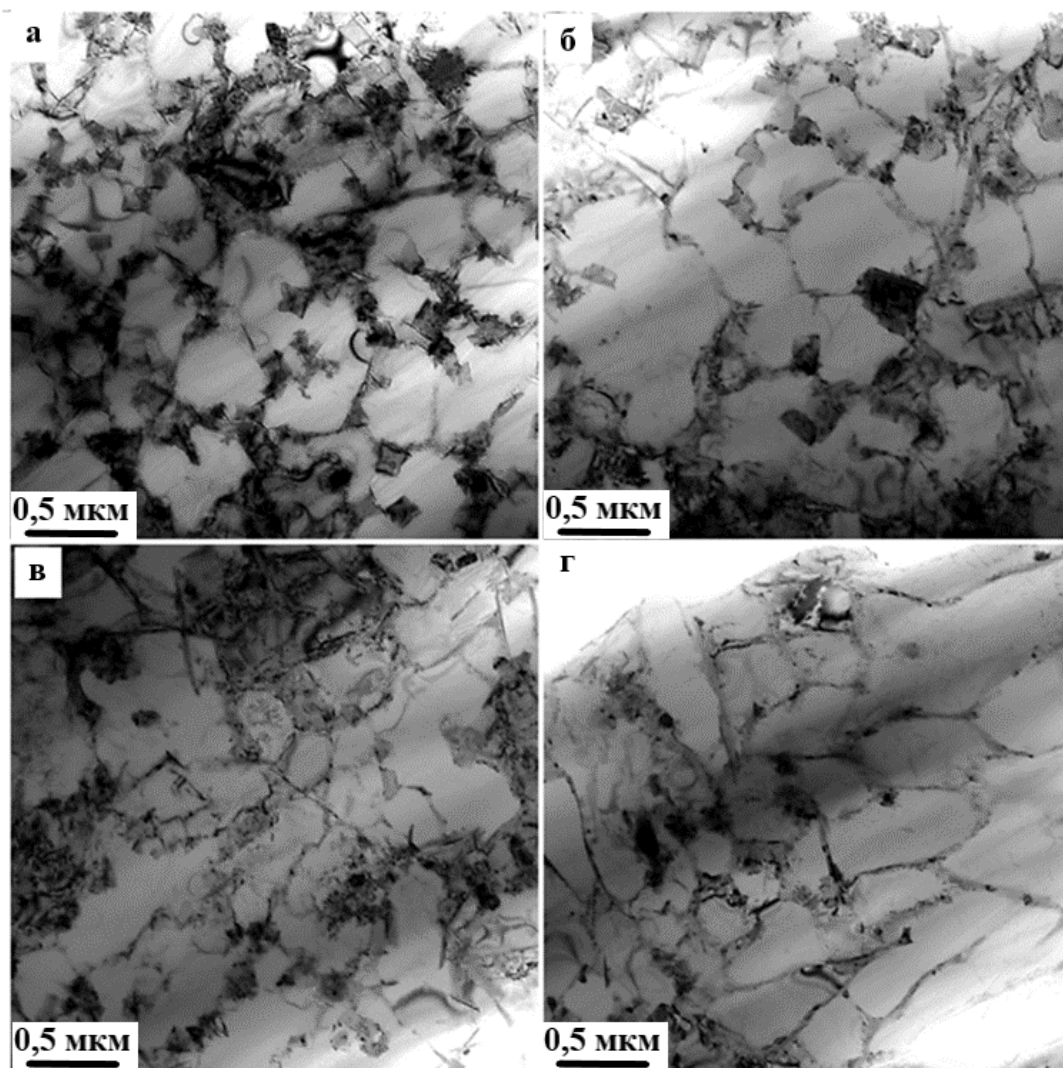


Рисунок 6 – Структура сплава, подвергнутого двухэтапному модифицированию: а-г – слои, расположенные на расстоянии 20 мкм; 40 мкм; 65 мкм; 80 мкм от поверхности обработки, соответственно

Электронно-микроскопическое изображение структуры ячеистой кристаллизации модифицированного слоя представлено на рисунке 7. При детальном рассмотрении выявлено, что основной объем высокоскоростных кристаллизационных ячеек представлен твердым раствором с каркасом кристаллической решетки алюминия. Промежуточные слои, разделяющие отдельные кристаллизационные ячейки, содержат частицы кремния. Последние способны существенно влиять на механические и термические свойства полученной структуры.

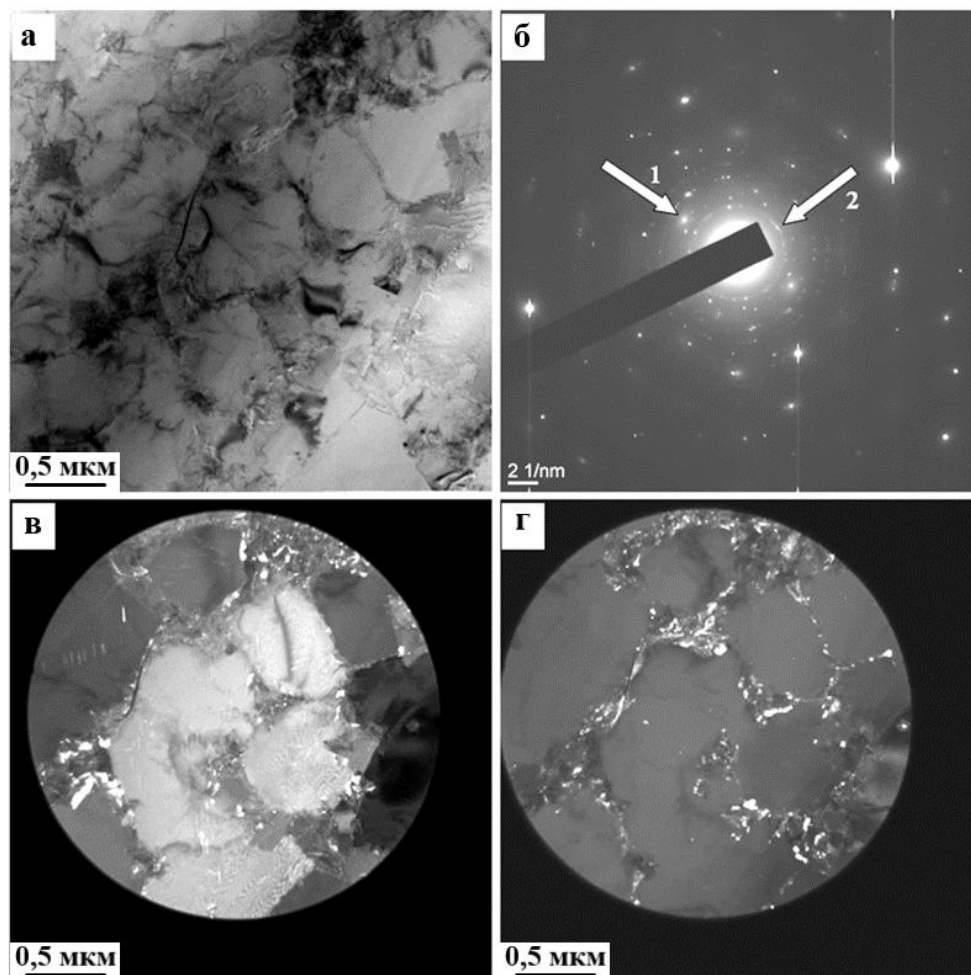


Рисунок 7 – Электронно-микроскопическое изображение структуры ячеистой кристаллизации поверхностного слоя образца, подвергнутого двухэтапной обработке по 1-му режиму: а – светлое поле; б – микроэлектронограмма (стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – (в), 2 – (г)); в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[111]$ Al (в) и $[111]$ Si (г), соответственно

В режиме 2 двухэтапная обработка поверхности силумина Al-11%Si привела к кардинальному преобразованию структуры поверхностного слоя материала толщиной ≈ 70 мкм, заключающемуся в растворении включений кремния и интерметаллидов, характерных для литого состояния исследуемого материала, и формировании градиентной многоэлементной субмикронаноразмерной структуры.

Отчетливо видно, что в результате двухэтапной обработки формируется рельефная поверхность, содержащая области, различающиеся контрастом (рисунок 8, а). Последнее может указывать на неоднородность элементного состава поверхностного слоя материала. Формирующийся поверхностный слой имеет субмикрокристаллическую структуру, размеры кристаллитов которой не превышают 1 мкм (рисунок 8, б).

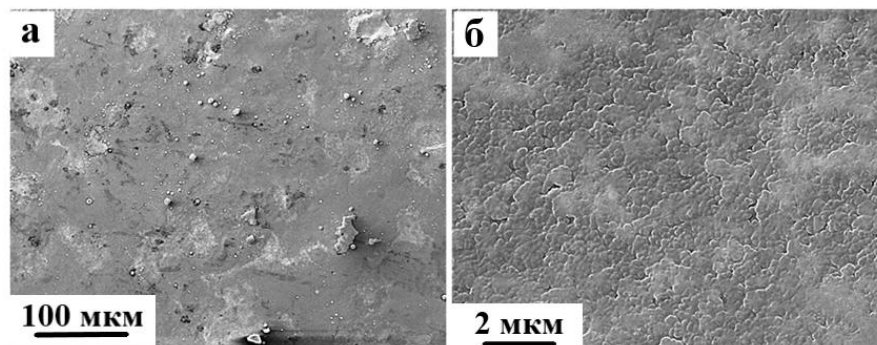


Рисунок 8 – Структура модифицированной поверхности силумина

Установлено, что модифицированный слой толщиной до 70 мкм имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Размеры ячеек имеют диапазон от 0,5 мкм до 1,2 мкм. На рисунке 9, б видно, что данные ячейки разделены прослойками второй фазы. Структура поверхностного слоя характеризуется наличием включений ограненной формы, которые визуальны представлены на рисунке 9 (включения темного цвета) и имеют диапазон размеров от 40 нм до 80 нм. Кроме того, следует отметить, что относительное содержание таких включений имеет тенденцию к снижению по мере постепенного удаления от поверхности модификации, что свидетельствует о пространственных различиях в распределении этих микроструктурных элементов, которые могут повлиять на общие свойства и поведение материала.

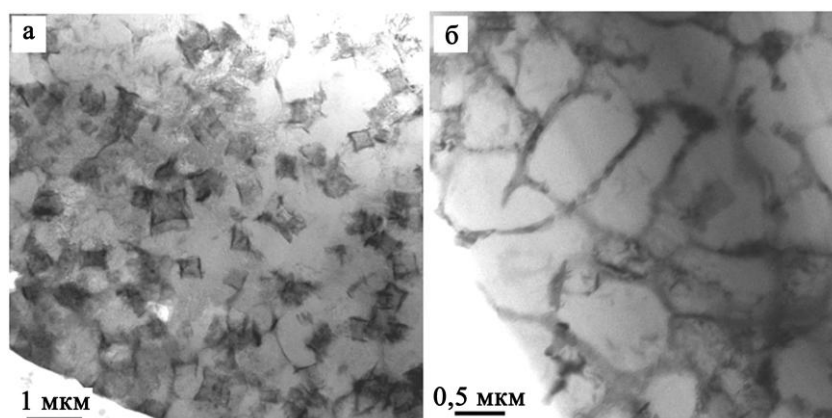


Рисунок 9 – Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава, подвергнутого двухэтапной обработке по 2-му режиму: а – структура поверхностного слоя; б – структура слоя, расположенного на глубине (20-30) мкм

Модифицированием поверхностного слоя заэвтектического сплава Al-20%Si, сочетающим электровзрывное легирование системой Al-Y₂O₃ с последующим облучением импульсным электронным пучком, установлено, что независимо от режима модифицирования в поверхностном слое формируется многослойная структура, состоящая из слоев: поверхностный слой и промежуточный слой (рисунок 10, а). Поверхностный слой (слой I), состоит из сферических частиц, размеры которых, как показано на рисунке 10, б

колеблются в диапазоне от 10 до 20 нм. Толщина этого слоя составляет около 1 мкм. Переходный слой (слой II) толщиной до 40 мкм демонстрирует высокоскоростную ячеистую кристаллизационную структуру, особенно характерную для силумина, подвергнутого обработке импульсным электронным пучком в процессе плавления поверхности. Этот промежуточный слой особенно отличается наличием глобулярных включений, образующихся в результате агрегации наноразмерных округлых частиц, как показано на рисунке 10, в. Можно предположить, что эти включения действительно представляют собой конгломераты, образованные из частиц оксида иттрия, что указывает на сложное взаимодействие в микроструктуре материала.

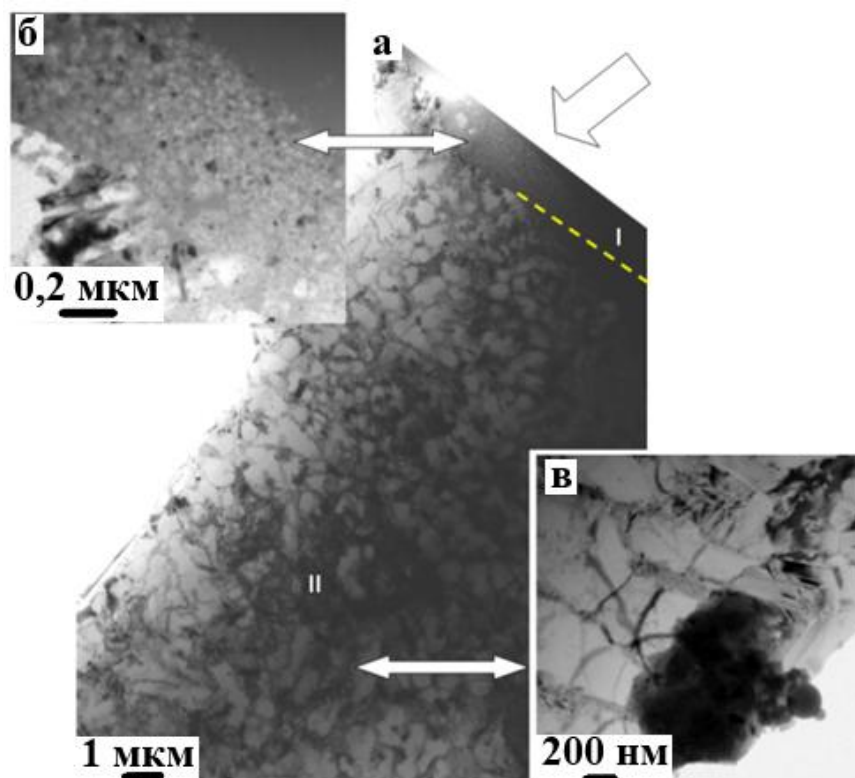


Рисунок 10 – Структура поверхностного слоя сплава Al-20%Si, модифицированного двухэтапной обработкой

Установлено, что фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз (Al, Si, Y_2O_3) существенным образом зависят от режима модифицирования. Основной фазой сплава является твердый раствор на основе алюминия, относительное содержание которого весьма слабо зависит от режима модифицирования сплава.

Анализ морфологических характеристик, размерных характеристик и фазового распределения, присутствующих в поверхностном слое Al-20%Si, подвергнутого двухэтапной обработки, был проведен с помощью методов просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. На рисунке 11 приведены результаты микродифракционного анализа поверхностного слоя (слоя I, рисунок 11, а, б).

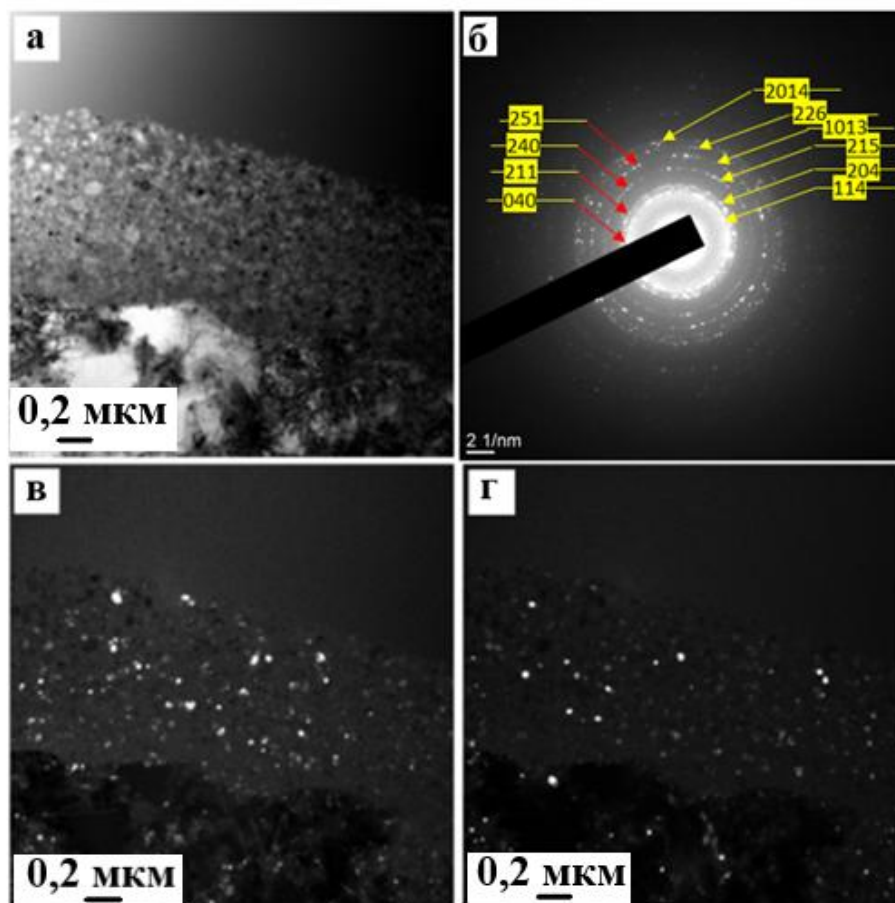


Рисунок 11 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя сплава Al-20%Si, сформировавшегося в результате двухэтапной обработки: а – светлое поле; б – микроэлектронogramма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[204]YAl_3$, $[211]Y_2Si_2O_7$ (в); $[1013]YAl_3$, $[251]Y_2Si_2O_7$ (г); на (б) указаны дифракционные кольца, в которых получены темнопольные изображения: 1 – для (в), 2 – для (г). Желтыми стрелками указаны дифракционные кольца, принадлежащие фазе YAl_3 ; Красными стрелками указаны дифракционные кольца, принадлежащие фазе $Y_2Si_2O_7$

На темнопольных изображениях данного слоя (рисунок 11, в, г) отчетливо видно, что слой является наноструктурным образованием и сформирован округлыми частицами. Индцирование микроэлектронogramмы (рисунок 11, б) позволило выявить рефлексy фаз YAl_3 (отмечены желтыми стрелками) и $Y_2Si_2O_7$ (отмечены красными стрелками). Таким образом, установлено, что поверхностный слой сформировался в результате взаимодействия частиц Y_2O_3 с расплавом сплава Al-20%Si, что привело к образованию набора новых фаз, обнаруженных в данном слое.

На рисунке 12 приведено электронно-микроскопическое изображение структуры переходного слоя. Отчетливо видно, что данный слой сформирован ячейками высокоскоростной кристаллизации, образовавшимися в результате высокоскоростного охлаждения расплавленного слоя.

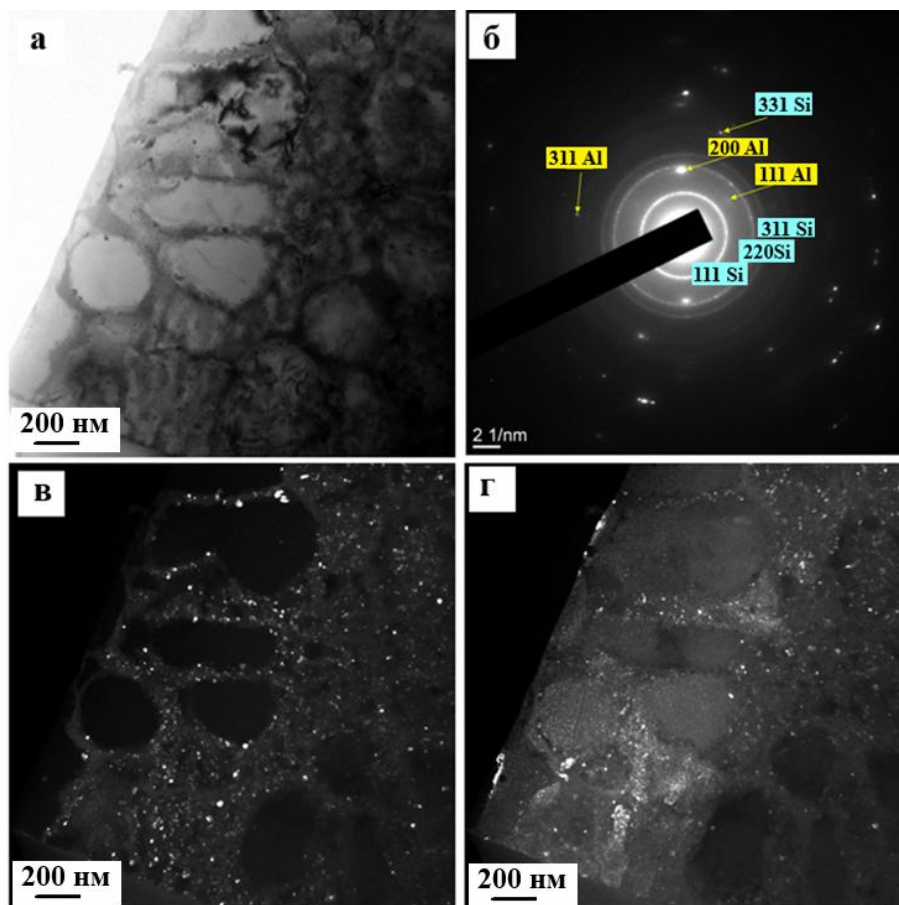


Рисунок 12 – Электронно-микроскопическое изображение структуры переходного слоя сплава Al-20%Si, сформировавшегося в результате двухэтапной обработки: а – светлое поле; б – микроэлектронogramма; в, г – темные поля, полученные в рефlekсах $[220]\text{Si}$ (в) и $[200]\text{Al}$ (г)

Анализ микроэлектронogramмы дает основание заключить, что ячейки сформированы твердым раствором на основе алюминия (рисунок 12, г). Ячейки разделены тонкими прослойками, сформированными наноразмерными частицами. Индексирование микроэлектронogramмы показывает, что данные частицы являются кремнием (рисунок 12, в). Анализируя результаты, представленные на рисунке 12, в, можно отметить, что прослойки кремния, располагающиеся вдоль границ и в стыках границ ячеек кристаллизации, сформированных твердым раствором на основе алюминия, имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов, изменяющимся в пределах $\sim 10\text{-}20$ нм.

В заключении изложены основные результаты исследования.

В приложении «Апробация результатов диссертационной работы» приведена практическая и академическая значимость проведенных исследований и полученных результатов для предприятий и образовательных организаций высшего профессионального образования, подтвержденная актами и справками об использовании результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Методами современного физического материаловедения установлены закономерности формирования структурно-фазовых состояний и механических

свойств силуминов до- и заэвтектического состава, подвергнутых электровзрывному легированию и электронно-пучковой обработке. При этом:

1. Установлено, что электровзрывное легирование системой Al-Y₂O₃ силуминов Al-11%Si и Al-20%Si, приводит к увеличению микротвердости в 2,5 и 2 раза, соответственно.

2. Двухэтапная обработка приводит к более существенным изменениям микротвердости силумина Al-11%Si, чем Al-20%Si. Максимальное увеличение микротвердости наблюдается при режиме двухэтапной обработки №2 и составляет 316 HV для силумина Al-11%Si и 90 HV для силумина Al-20%Si.

3. Электровзрывное легирование силумина Al-11%Si и Al-20%Si приводит к образованию высокопористого поверхностного слоя с переменной толщиной: от 17 до 117 мкм для Al-11%Si и от 30 до 200 мкм для Al-20%Si. Полученные слои характеризуются выраженной неоднородностью в распределении легирующих элементов.

4. Двухэтапная обработка поверхности силумина Al-11%Si по следующему режиму: электровзрывное легирование (масса алюминиевой фольги – 58,9 мг, масса порошка Y₂O₃ – 58,9 мг, напряжение разряда – 2,8 кВ) и последующая электронно-пучковая обработка (плотность энергии пучка – 35 Дж/см²), обеспечивает формирование модифицированного слоя толщиной около 70 мкм. В этом слое наблюдается растворение включений кремния и интерметаллидов.

5. Установлено, что модифицированный слой имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации и содержит включения ограниченной формы, относительное содержание которых снижается по мере удаления от поверхности модифицирования.

6. Двухэтапное модифицирование поверхности сплава Al-20%Si приводит к формированию многослойной структуры, включающей поверхностный и промежуточный слои, при этом толщина последнего составляет около 40 мкм. Полученный модифицированный слой отличается меньшей пористостью по сравнению с продуктом электровзрывного легирования и обладает многофазной структурой с субмикро- и наноразмерными кристаллитами (размером от нескольких единиц до сотен нанометров).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи из перечня, рекомендованного ВАК РФ для опубликования результатов диссертационного исследования:

1. Иванов, Ю. Ф. Электронно-плазменное модифицирование поверхности доэвтектического силумина титаном и иттрием / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Д. В. Загуляев, О. С. Толкачев, Ю. А. Рубанникова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – №2. – С. 199-208. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39166933>

2. 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. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41041288>

3. 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. Petrikova, A. D. Teresov, **Yu. A. Rubannikova**, A. P. Semin // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2019. – Vol. 13. – No. 6. – P.1343-1349. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1027451019060326>

4. 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. – No. 5. – P. 809-813. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1027451019050069>

5. Иванов, Ю. Ф. Повышение функциональных свойств сплавов электронно-пучковой обработкой / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, Д. В. Загуляев, С. В. Коновалов, **Ю. А. Рубанникова** // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 129-134. – URL: <https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2063>

6. **Shliarova, Yu. A.** Study of the structure and properties of Al-Si alloy irradiated by electron-ion-plasma / **Yu. A. Shliarova**, V. V. Shlyarov, D. V. Zagulyaev, Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov // *Letters on Materials*. – 2023. – Vol. 13. – No. 3 (51). – P. 219–224. – URL: <https://lettersonmaterials.com/en/Readers/Article.aspx?aid=42281>

7. **Шлярова, Ю. А.** Изменение микротвердости и фазового состава сплава АК15, подвергнутого электровзрывному легированию и обработке электронным пучком / **Ю. А. Шлярова**, А. А. Серебрякова, В. В. Шляров, А. Н. Прудников, Д. В. Загуляев // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2024. – № 4. – С. 46–54. – URL: <https://vestnik.sibsiu.ru/index.php/vestnik/article/view/534>

8. **Шлярова, Ю. А.** Влияние электровзрывного легирования и электронно-пучкового воздействия на морфологию поверхности и шероховатость сплава Al-15%Si / **Ю. А. Шлярова**, В. В. Шляров, Д. В. Загуляев, В. Е. Громов // *Инженерная физика*. – 2025. – № 3. – С. 33-42. – URL: <http://infiz.tgizd.ru/ru/arhiv/23402>

Статьи в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных Web of Science и Scopus:

1. Konovalov, S. Dispersion of Al-Si alloy structure by intensive pulsed electron beam / S. Konovalov, V. Gromov, D. Zagulyaev, Yu. Ivanov, A. Semin, **J. Rubannikova** // *Archives of foundry engineering*. – 2019. – Vol. 19. – Issue 2. – P. 79-84. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Dispersion-of-Al-Si-Alloy-Structure-by-Intensive-Konovalov-Gromov/b445b20f3e14452f7028f13228b22cabc4f33ac1>

2. Ivanov, Yu. Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing / Yu. Ivanov, V.

- Gromov, D. Zagulyaev, A. Glezer, R. Sundeev, **Yu. Rubannikova**, Al. Semin // Materials Letters. – 2019. – Vol. 253. – P. 55–58. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X19308651?via%3Dihub>
3. 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. – P. 020398. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2167/1/020398/697606/Analysis-of-changes-in-structure-and-microhardness?redirectedFrom=fulltext>
 4. Ivanov, Yu. F. Nanostructure formation of hypoeutectic silumin by electron-ion-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. – P. 012091. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1393/1/012091>
 5. 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. Zagulyaev, S. V. Konovalov, **Yu. A. Rubannikova**, A. P. Semin // Progress in Physics of Metals. – 2019. – Vol. 20. – No. 4. – P. 634–671. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49237934>
 6. Zagulyaev, D. Structure and phase states modification of AL-11SI-2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam / D. Zagulyaev, V. Gromov, **Yu. Rubannikova**, S. Konovalov, Yu. Ivanov, D. Romanov, A. Semin // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 383. – P. 125246. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897219312368?via%3Dihub>
 7. 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 // Int. J. Nanotechnol. – 2019. – Vol. 16. – No. 6/7/8/9/10. – P. 619–628. – URL: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJNT.2019.106633>
 8. Zagulyaev, D. Effect of Electron-Plasma Treatment on the Microstructure of Al-11wt%Si Alloy / D. Zagulyaev, Yu. Ivanov, S. Konovalov, A. Abaturova, V. Gromov, **Yu. A. Rubannikova**, A. Semin // Materials Research. – 2020. – Vol. 23(2). – P. e20200057. – URL: <https://www.scielo.br/j/mr/a/z4nW45h9WKH5VhN7vfT6ndw/?lang=en>
 9. 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. Zagulyaev, S. V. Konovalov, **Yu. A. Rubannikova**, A. P. Semin // Progress in Physics of Metals. – 2020. – Vol. 21. – No. 3. – P. 345–362. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49207482>
 10. Zagulyaev, D. V. Change in crystal lattice parameter of silumins with different silicon content after electron beam processing / D. V. Zagulyaev, Yu. F. Ivanov, A. A. Leonov, D. F. Yakupov, **Yu. A. Rubannikova**, A. P. Semin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310. – P. 020357. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2310/1/020357/689373/Change-in-crystal-lattice-parameter-of-silumins?redirectedFrom=fulltext>

11. 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. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49209649>

12. **Shliarova, Y.** Structure–Phase Transformations in the Modified Surface of Al-20%Si Alloy Subjected to Two-Stage Treatment / **Y. Shliarova**, D. Zaguliaev, Y. Ivanov, V. Gromov, A. Prudnikov // Lubricants. – 2022. – Vol. 10. – P. 133. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4442/10/7/133>

Публикации в сборниках статей и трудов конференций:

1. **Rubannikova, Yu. A.** Structure and Phase States Modification of Al-Si Alloy by the Ion-Plasma Jet and Pulsed Electron Beam Treated / **Yu. Rubannikova**, D. Zaguliaev, V. Gromov, S. Konovalov, Yu. Ivanov // 21st International conference on surface modification of materials by ion beams (Tomsk, 25–30 августа 2019 года) / Elsevier; Tomsk Polytechnic University; Russian Foundation for Basic Research. – P. 62. – URL: <https://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/SMMIB2019.pdf>

2. **Шлярова, Ю. А.** Влияние электронно-пучковой обработки на величину области когерентного рассеяния и микроискажений кристаллической решетки сплавов системы Al-Si / **Ю. А. Шлярова**, Д. В. Загуляев, В. В. Шляров, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов., А. Н. Прудников // Научно-технический семинар «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов». (Москва, 25-27 октября 2022 г.) / Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», – Москва, 2022. – С. 160. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49800039>

3. **Шлярова, Ю. А.** Изменение микротвердости силуминов Al-11%Si и Al-20%Si, подвергнутых электровзрывному легированию с последующим облучением электронным пучком / **Ю. А. Шлярова**, Д. В. Загуляев, В. Е. Громов // Актуальные проблемы прочности: Материалы международной научной конференции (Витебск, 23–27 мая 2022 года) / под ред. В.В. Рубаника. – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 418-420. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49209355&pff=1>

4. **Шлярова, Ю. А.** Структура сплава системы Al-Si, подвергнутого двухэтапному модифицированию / **Ю. А. Шлярова**, Д. В. Загуляев, В. В. Шляров, В. Е. Громов, И. А. Панченко // III Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»: сборник трудов (г. Казань, 1-4 декабря 2022 г.) / М-во высшего образования и науки Рос. Федерации, М-во образования и науки Респ. Татарстан, Казанский нац. исследовательский технический ун-т и др. — Казань: Бук, 2022. – С.147-150. – URL: <https://gdp-nano.com/files/sbornik2022.pdf?ver=1>

5. **Шлярова, Ю. А.** Влияние электронно-пучковой обработки на параметр кристаллической решетки сплавов системы Al-Si с разным содержанием кремния / **Ю. А. Шлярова**, Д. В. Загуляев, В. В. Шляров, В. Е. Громов // Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения : Сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции (Томск, 17–21 октября 2022 года) / Под редакцией

С.П. Буяковой. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 387-389. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49904275&pff=1>

Монографии и главы в монографиях

1. 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. – ISBN 978-5-7806-0552-2

2. The effect of electron beam processing on the structure and properties of Al-Si alloys / D. V. Zaguliaev, V. E. Gromov, S. V. Kononov, Yu. F. Ivanov, V. V. Shlyarov, **Yu. A. Shliarova** // Strength and plasticity of materials under conditions of external energy effects : Monograph (Materials to 60th anniversary of scientific school) / Edited by V.E. Gromov. – Novokuznetsk : Полиграфист, 2022. – P. 23-38. ISBN: 978-5-91797-302-9

3. Эволюция фазового состава и структуры литых алюминиевых сплавов системы Al-Si, облученных импульсным электронным пучком / **Ю. А. Рубанникова**, Д. В. Загуляев, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, С. В. Коновалов, В. В. Шляров // В кн. «Структура и свойства твердых тел, подвергнутых высокоинтенсивному воздействию». – Под ред. Ковалю Н.Н. и Громова В.Е. – Новокузнецк. – 2020. – 178-196. ISBN: 978-5-91797-285-5

4. 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 // Современные наноматериалы / Сибирский государственный индустриальный университет; Омский государственный технический университет; Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»; Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности материалов. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2020. – С. 194-206. ISBN: 978-5-7806-0560-7

Подписано в печать «06» октября 2025 г.
Формат бумаги 60x84/16. Бумага офисная. Печать цифровая
Усл.печ.л. 1,39 Уч.изд.л.1,56 Тираж 100 экз. Заказ № 143

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42
Издательский центр СибГИУ