

На правах рукописи



Абатурова Анна Александровна

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ
СВОЙСТВ СПЛАВА АК10М2Н ПРИ ЭЛЕКТРОННО-
ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

Специальность 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Улан-Удэ – 2024

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

Научный руководитель: Загуляев Дмитрий Валерьевич - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М.Финкеля, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Официальные оппоненты: Курзина Ирина Александровна, доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующая кафедрой природных соединений, фармацевтической и медицинской химии Химического факультета

Акопян Торгом Кароевич, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», доцент сектора научной деятельности

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Защита состоится «20» декабря 2024 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.463.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, Бурятия, ул. Сахьяновой, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института монголоведения, буддологии и тибетологии Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте ИФМ СО РАН: www.ipms.bsnet.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

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



Зеленая А.Э.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время развитие техники и технологии требует, чтобы разрабатывались и производились новые материалы, которые бы обладали повышенными функциональными свойствами, и могли бы заменить традиционно используемые материалы.

Перспективными материалами, которые способны заменить стали, являются алюминий и сплавы на его основе. Связано это с двумя обстоятельствами. Во-первых, алюминий достаточно распространенный металл, точнее сказать это третий элемент после кислорода и кремния по массовому содержанию в твёрдой земной коре и первый среди металлов. Во-вторых, алюминий обладает уникальными свойствами. Он весит примерно в три раза меньше стали, пластичный, в меру прочный, ковкий металл, который при отливке, легко принимает любые формы, а оксидная пленка, формирующаяся на его поверхности, делает его устойчивым к коррозии, обладает высокой электропроводностью, не токсичен, легок в переработке. Ограничивающим фактором сферы использования алюминия, являются его сравнительно низкие прочностные свойства.

В данной связи приходится прибегать к современным методам увеличения прочностных свойств, в частности к обработке концентрированными потоками энергии. Электронно-пучковая обработка является хорошо зарекомендовавшим себя методом поверхностного упрочнения.

В связи с изложенным представленная работа является **актуальной**, поскольку направлена на изменение свойств сплава АК10М2Н методом электронно-пучковой обработки и анализ структурно-фазовых превращений при этом происходящих.

Степень разработанности темы

К настоящему времени доказано, что улучшение свойств может быть достигнуто при обработке поверхности концентрированными потоками энергии, такими как лазерное излучение, мощные ионные пучки, плазменные потоки и струи, которые, в свою очередь, являются очень экономичными и экологичными. Данные виды обработки позволяют осуществить модифицирование локально, то есть в тех местах, где непосредственно происходит разрушение в процессе эксплуатации изделия. Одним из наиболее перспективных и продемонстрировавших высокую эффективность методов поверхностного упрочнения изделий является электронно-пучковая обработка. Она обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до

10^6 К/с) поверхностного слоя до заданных температур и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростями 10^4 - 10^9 К/с, в результате чего в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния.

Исследования последних лет показали, что электронно-пучковая обработка приводит к увеличению усталостной долговечности и изменению структурно-фазовых состояний алюминиевых сплавов, в том числе сплавов Al с Si. Однако роль электронно-пучковой обработки в увеличении дюрометрических, трибологических и деформационных свойств сплава АК10М2Н и их связь со структурно-фазовыми превращениями до сих пор не установлена.

Результаты исследований по изменению механических характеристик, структуры и фазового состава сплавов на основе железа, при облучении электронным пучком, проведены в работах Иванова Ю.Ф., Петриковой Е.А., Тересова А.Д., Иванова О.В. и др., а также китайских ученых - профессора Y. Fu, J. Kim, R. Wang.

Эффективность защитных покрытий сталей, полученных методом электронно-лучевого легирования, повышающих твердость и износостойкость деталей доказана в работах Семенова А.П., Дашеева Д.Э., Улаханова Н.С. и др.

Влияние электронно-пучковой обработки на физико-механические характеристики и структурно-фазовые состояния цветных металлических материалов исследовано в работах Шулова В.А., Энгелько В.И., Громова А.Н., Теряева Д.А. и др.

Повышение коррозионной стойкости и твердости поверхности холоднокатанного сплава 2024, после модифицирования поверхности сильноточным импульсным электронным пучком, доказано в работах коллектива ученых из КНР - Yan P., Grosdidier T., Zhang X., Zou J.

Цель работы: установление физической природы изменения микротвердости, коэффициента трения, износостойкости и деформационных свойств сплава АК10М2Н, подвергнутого электронно-пучковой обработке за счет анализа структурно-фазовых превращений, происходящих в материале при внешнем энергетическом воздействии.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнить электронно-пучковую обработку в различных режимах поверхностного слоя образцов, изготовленных из

силумина АК10М2Н;

2. Провести комплекс испытаний по определению дюрOMETрических, трибологических и деформационных свойств (микротвердость, коэффициент трения, износостойкость, предел прочности, предел текучести) образцов после энергетического воздействия в различных режимах;

3. По результатам исследования дюрOMETрических, трибологических и деформационных свойств определить наиболее благоприятные режимы обработки, которые приводят к улучшению свойств;

4. Установить, зависимость толщины модифицированного электронным пучком слоя от плотности энергии пучка электронов;

5. Выполнить структурно-фазовый анализ образцов в состоянии поставки и после электронно-пучковой обработки в благоприятных режимах методами оптической, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

6. Сопоставить данные структурных исследований с данными по изменению дюрOMETрических, трибологических и деформационных свойств, установить факторы, ответственные за их изменение.

Научная и практическая значимость работы.

Полученные в результате выполнения работы данные возможно использовать для развития научных, научно-технических и технологических направлений, при разработке новых технологических решений по увеличению дюрOMETрических, трибологических и деформационных свойств изделий из Al-Si сплавов для их дальнейшего применения в промышленности. Например, в машиностроении, из силуминов изготавливаются втулочные подшипники, поршни двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, а также другие детали, работающие в условиях трения. Результаты работы способствуют развитию последующих опытно-конструкторских работ по внедрению электронно-пучковой обработки в цикл производства различных деталей и узлов. Практическая значимость подтверждена актами апробирования результатов работы в промышленности.

Основные положения работы представляют интерес как учебный материал в курсе лекций по физике конденсированного состояния, физического материаловедения, металловедения и термообработки. Результаты работы будут использованы при подготовке докторских и

кандидатских диссертаций по специальностям 22.06.01 – Технологии материалов, 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 2.6.17 – Материаловедение, 03.06.01 – Физика и астрономия, 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, а также общеобразовательных курсов. Полученные результаты будут использованы при подготовке монографий, учебных пособий по курсам «физика конденсированного состояния», «физическое материаловедение», «металловедение и термообработка». В целом выполненное диссертационное исследование способствует развитию научного направления влияния внешних энергетических воздействий на структуру и свойства металлических материалов, расширяет область знаний при подготовке специалистов и научно-образовательных кадров в области новых металлургических, в том числе и нано, технологий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 3.1283.2017/ПЧ) и гранта Российского научного фонда по мероприятию «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными (№19-79-10059).

Научная новизна. Современными методами материаловедения впервые определены физические механизмы, ответственные за изменения микротвердости, коэффициента трения, износостойкости и деформационных характеристик сплава АК10М2Н, подвергнутого электронно-пучковой обработке, а именно воздействие электронного пучка на поверхность Al-Si сплава приводит к образованию в поверхностных слоях нанокристаллической структуры ячеистой кристаллизации и растворению интерметаллидных соединений $AlCu_3$, Cu_9Al_4 , $Cu_{8,92}Al_{4,08}$, $Cu_{5,64}Al_{4,61}$, $Fe_2Al_9Si_2$, присутствующих в структуре исходного материала.

Определен наиболее благоприятный режим, приводящий к максимальному, одновременно, увеличению прочностных и пластических свойств сплава АК10М2Н. Основные параметры электронно-пучковой обработки следующие: плотность энергии пучка электронов 50 Дж/см^2 , длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3. В условиях воздействия электронным пучком по выше обозначенному режиму увеличение предела прочности составило 75 % по сравнению с пределом прочности литого сплава. Относительное остаточное удлинение и сужение при разрыве увеличивается на 150%.

Методология и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились с использованием аналитического и испытательного оборудования кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, центра коллективного пользования «Материаловедение», функционирующих на базе Сибирского государственного индустриального университета и Томского материаловедческого центра коллективного пользования, созданного на базе Национального исследовательского Томского государственного университета.

В ходе выполнения работы, для модификации поверхностных слоев силумина, была использована оригинальная автоматизированная установка «СОЛО» (Россия, г. Томск). ДюрOMETрические, трибологические и деформационные свойства модифицированного сплава определяли с помощью микротвердомера HVS-1000 (Time Group, Китай), ультрамикротвердомера DUH-211S (Shimadzu, Япония), трибометрах Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) и СН 2000 (CSEM, Швейцария), универсальной испытательной машине «INSTRON 3386» (INSTRON, США) соответственно. Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры выполняли с привлечением комплекса современного материаловедческого оборудования, а именно: микрорентгеноспектральный анализ Inca X-Act (Oxford Instruments Analytical, Великобритания); оптическая GX-51 (Olympus, Япония), сканирующая (СЭМ) и просвечивающая (ПЭМ) дифракционная электронная микроскопия VEGA (TESCAN, a.s., Чехия) и SEM-515 (Philips, Германия), оснащенный микроанализатором ECON IV (EDAX, США) и JEM-2100F (JEOL, Япония); рентгеноструктурный анализ (дифрактометр XRD-7000s (Shimadzu, Япония)); фольги для ПЭМ анализа готовились с использованием прибора Ion Slicer EM-09100IS (JEOL, Япония).

Достоверность результатов обусловлена большим объемом экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов физики конденсированного состояния, соответствием полученных экспериментальных данных и результатов других исследователей, использованием для анализа результатов апробированных теоретических представлений физики конденсированного состояния.

Положения, выносимые на защиту:

1. Электронно-пучковая обработка сопровождается плавлением и гомогенизацией поверхностного слоя сплава АК10М2Н.

Наблюдается увеличение микротвердости, независимо от режимов обработки. Эффективным режимом, приводящим к максимальному увеличению микротвердости, является режим 30 Дж/см^2 (150 мкс).

2. В области модифицированного слоя параметр пластичности имеет минимальные значения, независимо от режимов обработки. Измельчение дисперсионных включений кремния и интерметаллидов, в условиях энергетического воздействия, способствует повышению триботехнических свойств силумина, за счет замедления развития процессов схватывания и выкрашивания упрочняющих частиц. Интенсивность изнашивания снижается после облучения электронным пучком в режиме 35 Дж/см^2 (150 мкс) в $\approx 6,6$ раза при параметрах трибонагружения ($P=1 \text{ Н}$, $V=25 \text{ мм/с}$) и в $\approx 3,5$ раза при $P=2 \text{ Н}$, $V=10 \text{ мм/с}$.

3. Наиболее эффективным режимом, приводящим к максимальному, одновременному увеличению прочностных и пластических свойств сплава АК10М2Н, является режим 50 Дж/см^2 , 200 мкс, обусловленный выделением двух стадий деформационного упрочнения силумина, характеризуемыми разными коэффициентами.

4. Электронно-пучковая обработка сплава АК10М2Н позволяет получить субмикрокристаллические ячейки высокоскоростной кристаллизации размерами 300-600 нм, сформированные в поверхностном слое материала в результате высокоскоростного охлаждения. Такая структура приводит к увеличению прочностных и пластических характеристик Al-Si сплавов.

Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора литературных источников, формировании плана исследований, выполнении трибологических, дюраметрических и деформационных исследований, анализе структурно-фазовых превращений сплава АК10М2Н после электронно-пучковой обработки, определении корреляции полученных данных между собой и с результатами других авторов, выявлении причин, ответственных за изменение микротвердости, коэффициента трения и износостойкости, формулировании выводов и положений, выносимых на защиту, написании и подготовке статей к публикации.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов обусловлена большим объемом экспериментальных данных, полученных с использованием

современных методов физики конденсированного состояния, соответствием полученных экспериментальных данных и результатов других исследователей, использованием для анализа результатов апробированных теоретических представлений физики конденсированного состояния.

Результаты диссертационной работы представлялись на следующих научных конференциях и семинарах:

1. LXIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (АПП-2021), Тольятти, Россия, 13 - 17 сентября 2021 г.;

2. XXII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество», Новокузнецк, Россия, 10 – 11 ноября 2021 г.;

3. Международная научно-техническая конференция, посвященная 150-летию со дня рождения академика А.А. Байкова «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», Курск, Россия, 8 сентября 2020 г.;

4. 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020), Tomsk, Russia, 14-16 September 2020 г.;

5. Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», Новокузнецк, Россия, 19-21 мая 2020 г.;

6. International conference “Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology” Tomsk, Russia, 5–9 October 2020;

7. LXVIII Международная научная конференция «Актуальные проблемы прочности», Витебск, Беларусь, 27-31 мая 2024 года.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах: 1 монография; 2 статьи из перечня рекомендованного ВАК РФ для опубликования результатов диссертационного исследования; 6 статей в научных реферируемых изданиях индексируемых международными реферативными базами данных Scopus и Web of Science; 2 статьи опубликованные в трудах научно-практических конференций; получено 1 свидетельство о регистрации базы данных.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа по своему содержанию, поставленным целям и задачам, методикам исследования соответствует п.4 «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия

различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ» паспорта специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» (технические науки).

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, списка литературы из 145 наименований. Диссертация содержит 148 страниц машинописного текста, в том числе 5 таблиц и 36 рисунков, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна, достоверность, практическая значимость научных результатов проведенного исследования, излагается и личный вклад автора.

В первом разделе *«Современные научные тенденции в применении электронно-пучковой обработки для модификации металлических материалов»* приведен обзор статей в ведущих зарубежных и российских научных журналах, монографий и патентов по тематике исследуемой проблемы. Представлены общие сведения о методе поверхностного упрочнения электронными пучками металлических материалов. Проанализировано влияние электронно-пучковой обработки на структурно-фазовые превращения и изменения свойств сплавов на основе железа, цветных металлических сплавов и драгоценных металлов. Анализ имеющихся теоретических и экспериментальных исследований позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Во втором разделе *«Методы исследования и обработки экспериментальных данных»* приводится описание методов физического материаловедения, используемых при выполнении работы. Рассматриваются методики обработки экспериментальных данных. Обоснован выбор материала для исследований.

Модифицирование поверхности методом электронно-пучковой обработки производили с помощью установки «СОЛЮ» (Россия, г. Томск).

Образцы силумина АК10М2Н облучались интенсивным импульсным электронным пучком по 16 режимам, различающихся плотностью энергии пучка электронов и временем импульса. Электронный пучок ориентировался по нормали к плоскости

образца с размерами 15x15 мм², а диаметр пучка выбирался из условий охватывания всей площади поверхности образца.

Микротвердость измеряли методом восстановленного отпечатка, непосредственно на поверхности, подвергнутой облучению, с помощью микротвердомеров HVS-1000 и DUN-211S.

Трибологические испытания проводили по схеме “pin-on-disc” на трибометрах Oscillating TRIBOtester (при нагрузке P=1 Н, скорости скольжения V=25 мм/с) и СН 2000 (при нагрузке P=2 Н и скорости скольжения V=10 мм/с; диаметр контртела составлял 6 мм).

Разрушение всех образцов в режиме растяжения осуществляли на установке «INSTRON 3386» с постоянной скоростью 2,0 мм/мин, не менее чем по 3 образца для каждого режима электронного пучка.

Выявление микроструктурных составляющих методом металлографического анализа было выполнено с использованием оптического микроскопа GX-51.

Анализ элементного и фазового состава, дефектной субструктуры модифицированного слоя осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии на приборах SEM-515, оснащенный микроанализатором ECON IV и аналитическом сканирующем электронном микроскопе VEGA SB.

Определение химического состава осуществлялось с помощью энергодисперсионного детектора микрорентгеноспектрального анализа INCAx-act. Элементный анализ отдельных фаз проводили методом электронно-зондового микроанализа.

Фазовый состав модифицированных слоев, определяли методом рентгенофазового анализа (дифрактометр XRD-7000s).

Фольги для исследования структурно-фазового состояния материала методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии готовили путем ионного утонения пластинок толщиной h ~100 мкм, на приборе Ion Slicer EM-09100IS.

Дефектную структуру образцов анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (прибор JEM-2100F).

В третьем разделе *«Изменение микротвердости, трибологических и деформационных свойств сплава АК10М2Н после облучения электронным пучком в различных режимах»* выполнены исследования влияния электронно-пучковой обработки на микротвердость, а также проанализированы трибологические и деформационные свойства сплава АК10М2Н.

Установлено, что облучение силумина электронным пучком независимо от плотности пучка электронов (длительность импульса 150 мкс.) сопровождается плавлением и гомогенизацией поверхностного слоя материала.

Обнаружено, что независимо от режимов обработки микротвердость образцов в зоне, подвергнутой облучению, больше, чем на расстояниях 90 и 70 мкм от поверхности образца (рисунок 1).

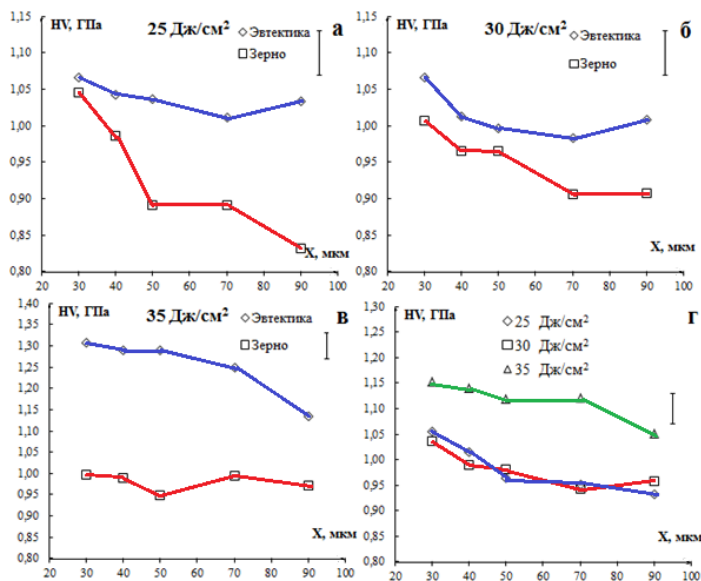


Рисунок 1 – Зависимости распределения значений микротвердости в зернах и эвтектике силумина на различных расстояниях от модифицированной поверхности (а – 25 Дж/см², б – 30 Дж/см², в – 35 Дж/см², г – в среднем по материалу, длительность импульса 150 мкс) -

Микротвердость силумина в эвтектике больше, чем в зернах, оптимальными параметрами обработки, приводящими к максимальному увеличению микротвердости, является режим 30 Дж/см² (150 мкс).

Фрикционные свойства модифицированного сплава характеризовали интенсивностью износа и коэффициентом трения для литого состояния и после облучения электронным пучком с плотностью энергии 35 Дж/см² и длительностью импульсов 150 мкс.

Анализ изменений коэффициента трения при разных

параметрах трибонагружения и состояниях сплава показывает, что облучение сопровождается снижением коэффициента трения независимо от параметров трибонагружения.

Сопоставление значений интенсивности износа для разных режимов трибонагружения образцов, находящихся в литом состоянии, показывает, что увеличение нагрузки и снижение скорости контртела приводит к уменьшению параметра износа примерно в 2 раза. Облучение сопровождается снижением и интенсивности изнашивания.

Также выявлено, что облучение сплава АК10М2Н сопровождается увеличением прочностных свойств, а именно предел прочности на разрыв независимо от плотности энергии пучка электронов увеличивается. Максимальное увеличение предела прочности наблюдается при режиме обработки с плотностью энергии пучка электронов 50 Дж/см², длительностью импульса 200 мкс, которое составляет 75 % по сравнению с пределом прочности литого сплава.

Одновременно с увеличением предела прочности на разрыв увеличиваются и пластические характеристики, а именно относительное остаточное удлинение и сужение при разрыве демонстрируют тенденцию к увеличению, независимо от плотности энергии пучка электронов.

Инженерные значения напряжения и деформации определялись по формулам $\sigma_{eng} = \left(\frac{F}{S_0}\right)$ и $\varepsilon_{eng} = \left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)$, где F – растягивающее усилие, S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, Δl – удлинение, l_0 – начальная длина рабочей части образца.

Истинное напряжение и истинная деформация определялись по формулам $\sigma_{true} = \left(\frac{F}{S_0}\right)\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)$ и $\varepsilon_{true} = \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)$, где F – растягивающее усилие, S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, Δl – удлинение и l_0 – начальная длина рабочей части образца.

Построенная деформационная кривая в координатах «истинное напряжение – истинная деформация в степени 0,3» позволяет выделить две стадии деформационного упрочнения силумина. Первая стадия – это начальная переходная стадия Т, и вторая стадия II. Вторую стадию II можно разбить на две подстадии из-за наличия двух линейных участков с разными углами наклона, то есть, разными

коэффициентами деформационного упрочнения (рисунок 2).

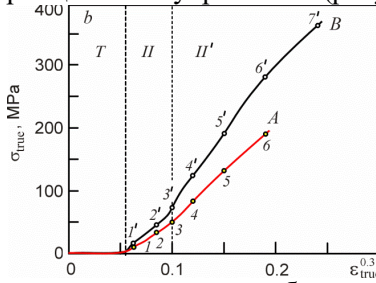


Рисунок 2 – Деформационная кривая облученного образца силумина АК10М2Н, построенная в координатах $\sigma_{true} - \epsilon_{true}^{0.3}$.

Спекл-картины, полученные при одноосной деформации растяжением облученных образцов, позволили установить отличия в эволюции спекл-картин на поверхности не облученных образцов с ростом внешних напряжений (рисунок 3 а для необлученного образца, рисунок 3 б для облученного образца).

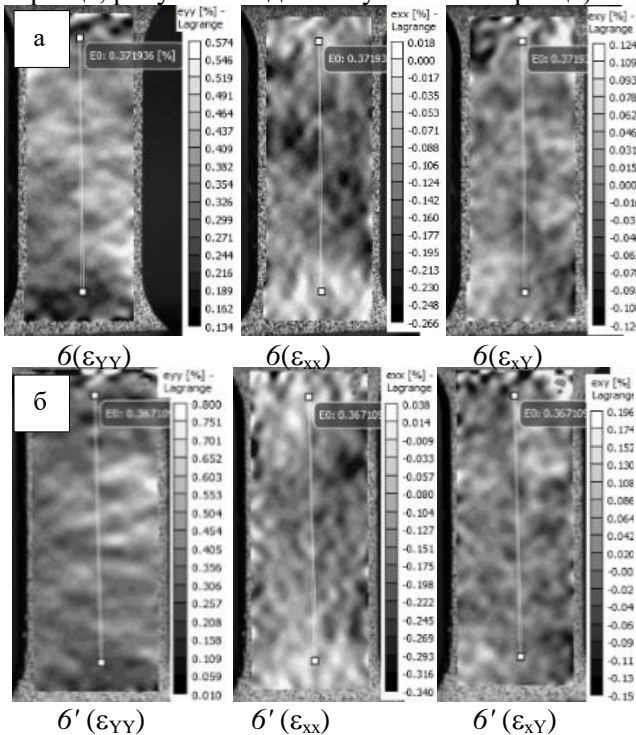


Рисунок 3 – Спекл-картины распределений вертикальных ϵ_{yy} , продольных ϵ_{xx} и сдвиговых относительных деформаций ϵ_{xy} на поверхности не облученного (а) и облученного (б) образца при одноосном растяжении при разных усредненных деформациях по рабочему полю образцов:
 б – $\epsilon_{xy}=0,347\%$ /
 б' – $\epsilon_{xy}=0,367\%$

На распределении продольных относительных деформаций наблюдается увеличение размеров локальных очагов деформации в центральной части образца. На спекл-картинах распределений сдвиговых поперечных относительных деформаций наблюдается образование перед разрушением вытянутых очагов деформации вдоль оси образца. Также наблюдается образование очагов деформации со значительными значениями деформации на боковых гранях образцов.

В четвертом разделе «Анализ изменений тонкой структуры и фазового состава поверхностных слоев сплава АК10М2Н, подвергнутого облучению интенсивным импульсным электронным пучком» представлены механизмы повышения прочности облученного силумина (относительно литого состояния).

Электронно-микроскопические изображения поверхности обработки сплава АК10М2Н при различных параметрах плотности энергии пучка электронов и длительности импульса, полученные методами сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 4.

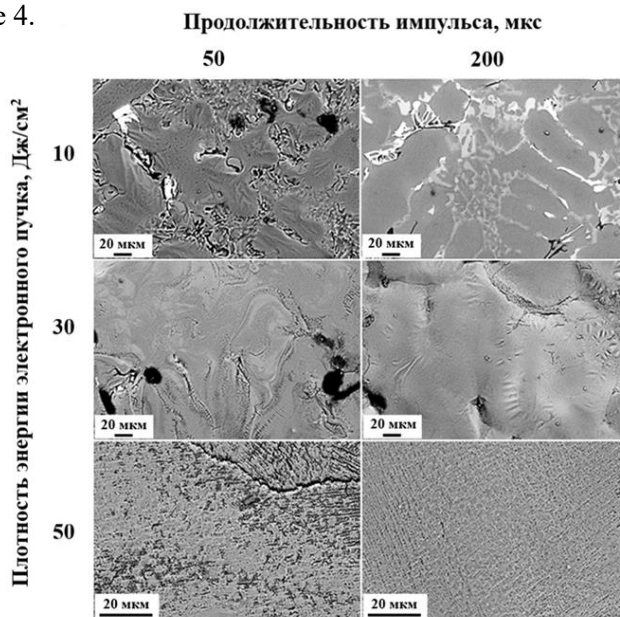


Рисунок 4 – Структура поверхности сплава АК10М2Н, подвергнутого облучению импульсным электронным пучком в различных режимах

Выявлено, что при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см^2 (150 мкс) структура представлена, так же, как и в литом состоянии, тремя фазами: зёрнами твердого раствора на основе алюминия, зёрнами эвтектики и интерметаллидами.

При плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 происходит растворение интерметаллидов и образование многочисленных микропор.

При плотности энергии пучка электронов 50 Дж/см^2 , независимо от длительности импульса, на поверхности облучения обнаружены нерегулярно расположенные микротрещины, причиной образования которых являются внутренние напряжения, возникающие в поверхностных слоях материала в результате сверхвысоких скоростей охлаждения расплавленного слоя, кристаллизующегося на интегрально холодной подложке.

Разрушение сплава АК10М2Н, подвергнутого обработке электронным пучком с параметрами 50 Дж/см^2 200 мкс , осуществляется путем перемещения микротрещин вдоль границы раздела ячеек кристаллизации, т.е. формируется интеркристаллитный (межзеренный) излом (рисунок 5).

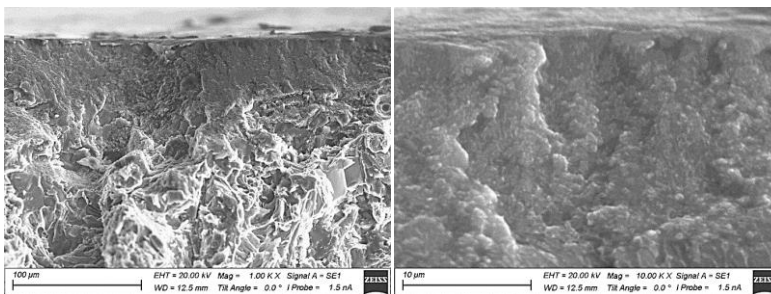


Рисунок 5 – Структура поверхности разрушения силумина АК10М2Н, облученного импульсным электронным пучком (50 Дж/см^2 , 200 мкс)

С целью установления причин, вызывающих изменения диаметрических и трибологических свойств, методами электронно-микроскопического анализа было установлено, что поверхностный слой имеет ячеистую структуру высокоскоростной кристаллизации. Размер ячеек изменяется в пределах от 350 нм до 550 нм . Ячейки разделены прослойками второй фазы, толщина которых изменяется в пределах от 80 нм до 200 нм . На расстоянии

120-130 мкм от поверхности облучения обнаруживаются первичные частицы кремния и интерметаллидов.

Просвечивающим электронно-микроскопическим анализом модифицированных (50 Дж/см^2 , 200 мкс) и разрушенных в режиме растяжения образцов силумина АК10М2Н выявлено, что пластическая деформация растяжением не приводит к разрушению структуры ячеистой высокоскоростной кристаллизации (рисунок 6 а). В объеме ячеек наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций (рисунок 6 б). Скалярная плотность дислокаций высока и достигает значений $(1-2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$

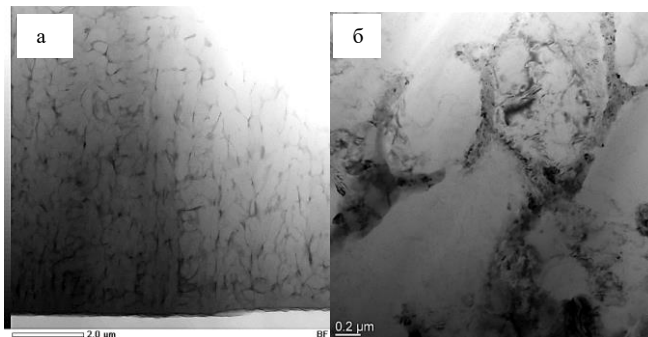


Рисунок 6 – Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина АК10М2Н, подвергнутого облучению (50 Дж/см^2 , 200 мкс) с последующим растяжением до разрушения; а – STEM анализ; б – ТЕМ анализ

В пятом разделе «Возможности практического применения результатов 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.

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

В настоящей диссертационной работе установлены закономерности влияния электронно-пучковой обработки на

структурные особенности поверхностных слоев эвтектического силумина АК10М2Н. Установлены режимы электронно-пучковой обработки, приводящие к образованию мелкозернистой, градиентной, ячеистой структуры на глубине до 100 мкм от поверхности модифицирования. Обработанный слой характеризуется раздробленными пластинами кремния и отсутствием интерметаллидов. Указанные факторы однозначно приведут к увеличению механических характеристик готовой продукции. Основные выводы:

1. Выполнены исследования влияния электронно-пучковой обработки по режимам: плотность энергии пучка электронов 10-50 Дж/см², длительность импульса 50-200 мкс на микротвердость, износостойкость, коэффициент трения, параметры триботрека, предела прочности и предела текучести при разрыве.

2. Установлено, что максимальное увеличение микротвердости наблюдается при режиме воздействия плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см², время импульса 150 мкс и составляет 1,41 ГПа после обработки в сравнении с 0,72 ГПа в литом состоянии (1,96 раза).

3. Обнаружено, что при параметрах облучения 35 Дж/см², время импульса 150 мкс происходит снижение коэффициента трения в $\approx 1,3$ раза, интенсивности изнашивания в $\approx 6,6$ раза. Анализ профилей триботрека показал снижение глубины в 3,6 раза и площади лунки трения в 4,9 раза, что связано с отсутствием в структуре облученного материала дисперсных включений кремния и интерметаллидов.

4. Проведен анализ влияния электронно-пучковой обработки на деформационные свойства сплава АК10М2Н и установлено, что при параметрах облучения 50 Дж/см², 200 мкс происходит увеличение предела прочности на 75 %, относительного остаточного удлинения и сужения при разрыве на 150 % по сравнению с характеристиками литого сплава, что говорит об одновременном увеличении прочностных и пластических свойств.

5. Установлены отличия в эволюции спекл-картин, полученных при одноосной деформации растяжением, на поверхности не облученных образцов с ростом внешних напряжений. Наблюдается увеличение размеров локальных очагов деформации в центральной части образца со значительным (2 раза) ростом значений деформации в сравнении с усредненной по всему рабочему полю образца деформацией.

6. Методами сканирующей электронной микроскопии на образцах, подвергнутых электронно-пучковой обработке по режимам с плотностью энергии 30-50 Дж/см², 100, 150, 200 мкс, установлено растворение кремния, глобуляризация включений интерметаллидов и формирование субмикроструктурной структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации с размерами кристаллитов 300-600 нм. Обнаруженные факторы являются причинами увеличения диаметрических, трибологических и деформационных свойств сплава АК10М2Н.

7. Исследования методами просвечивающей электронной микроскопии подтвердили образование, при облучении, в поверхностном слое толщиной до 100 мкм многослойной структуры ячеистой кристаллизации, свободной от первичных включений кремния и интерметаллидов.

8. Установлено, что при режиме облучения 50 Дж/см², 200 мкс разрушение в режиме растяжения протекает по двум механизмам. В поверхностном слое толщиной до 100 мкм излом имеет субмикроструктурное строение с размером ячеек 300-500 нм и разрушение, осуществляется путем перемещения микротрещин вдоль границы раздела ячеек кристаллизации, т.е. формируется интеркристаллитный (межзеренный) излом. На глубине более 100 мкм выявляется структура, формирующаяся при хрупком разрушении материала.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, в том числе:

Монография

1. Закономерности эволюции структурно-фазового состояния доэвтектического силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком, при пластической деформации / Д. В. Загуляев, Ю. А. Шлярова, А. А. Абатурова [и др.]. – Москва : Русайнс, 2024. – 204 с. – ISBN 978-5-466-07443-7. (13 п.л., в т.ч. авторских 2 п.л.)

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

2. Эволюция микроструктуры и микротвердости поршневого сплава Al-10Si-2Cu, облученного импульсным электронным пучком / В. В. Шляров, Д. В. Загуляев, А. А. Абатурова [и др.]. – DOI 10.25712/ASTU.1811-1416.2020.01.005 // **Фундаментальные**

проблемы современного материаловедения. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 32–39. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42843365> (0,45 п.л., в т.ч. авторских 0,1 п.л.)

3. Абатурова, А. А. Динамика деформационного поведения сплава АК10М2Н при электронно-пучковой обработке / А. А. Абатурова, Д. В. Загуляев, А. А. Серебрякова. – DOI 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-69-80 // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024. – № 1 (47). – С. 69–80. – URL: <https://vestnik.sibsiu.ru/index.php/vestnik/article/view/485> (0,75 п.л., в т.ч. авторских 0,3 п.л.)

Статьи в научных реферируемых изданиях индексируемых международными реферативными базами данных Scopus и Web of Science:

4. Analysis of Structure and Microhardness AlSi5Cu2 and AlSi10Cu2 Cast Alloys Subjected to Electron Beam Surface Melting / D. Zaguliaev, I. Chumachkov, Y. Ivanov [et al.] // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020), Tomsk, September 14–26, 2020. – Tomsk, 2020. – С. 737–740. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9242140> (0,25 п.л., в т.ч. авторских 0,05 п.л.)

5. Effect of Electron-Plasma Treatment on the Microstructure of Al-11wt%Si Alloy / D. Zaguliaev, S. Konovalov, A. Abaturova [et al.]. – DOI 10.1590/1980-5373-mr-2020-0057 // Materials Research. – 2020. – Vol. 23. – № 2. – P. e2020-0057. – URL: https://www.researchgate.net/publication/341996967_Effect_of_Electron-Plasma_Treatment_on_the_Microstructure_of_Al-11wtSi_Alloy (0,25 п.л., в т.ч. авторских 0,03 п.л.)

6. Modification of Al-10Si-2Cu Alloy Surface by Intensive Pulsed Electron Beam / S. Konovalov, D. Zaguliaev, V. Gromov [et al.]. – DOI 10.1016/j.jmrt.2020.03.083 // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, № 3. – P. 5591–5598. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420306773> (0,25 п.л., в т.ч. авторских 0,05 п.л.)

7. Microstructure and Microhardness of Piston Alloy Al-10Si-2Cu Irradiated by Pulsed Electron Beam / D. Zaguliaev, A. Abaturova, S. Konovalov [et al.]. – DOI 10.24425/afe.2020.133336 // Archives of Foundry Engineering. – 2020. – Vol. 20, № 3. – P. 92–98. – URL: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/133336/edition/116494/content> (0,25 п.л., в т.ч. авторских 0,05 п.л.)

8. Wear Resistance Evolution of Al-Si Aluminium Alloy After Electron Beam Processing / D. V. Zagulyaev, V. V. Shlyarov, A. A. Abaturova [et al.]. – DOI 10.1063/5.0034057 // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310, № 1. – P. 020358. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2310/1/020358/689267/> (0,25 п.л., в т.ч. авторских 0,05 п.л.)

9. Abaturova, A. A. The Influence of Electron-Beam Processing on the Formation of the Structure and Surface Properties of AK10M2N Alloy Destroyed under Tensile Conditions / A. A. Abaturova, D. V. Zagulyaev, A. A. Serebryakova. – DOI 10.1134/S106378502470038X // Technical Physics Letters. – 2024. – P. 1–6. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S106378502470038X> (0,25 п.л., в т.ч. авторских 0,09 п.л.)

Статьи, опубликованные в трудах научно-практических конференций:

10. Speckle patterns of AK10M2N samples before and after electron beam treatment / D. V. Zagulyaev, A. A. Abaturova, A. A. Serebryakova, Yu. A. Shlyarova // *Материалы во внешних полях (МВП–2024) : труды XII Международного онлайн-симпозиума, 20 марта 2024 / Сибирский государственный индустриальный университет ; под ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2024. – С. 40–42. – URL: https://libr.sibsiu.ru/MegaPro/UserEntry?Action=Link_FindDoc&id=90030&idb=0 (0,18 п.л., в т.ч. авторских 0,08 п.л.)*

11. Абатурова, А. А. Механические характеристики сплава AK10M2N подвергнутого электронно-пучковой обработки и разрушенного в условиях растяжения / А. А. Абатурова, Д. В. Загуляев, А. А. Серебрякова // *Актуальные проблемы прочности : материалы LXVIII международной научной конференции (Витебск, 27-31 мая 2024 года) / Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси ; под ред. В. В. Рубаника. – Минск : ИВЦ Минфина, 2024. – С. 156–158. – ISBN 978-985-880-474-9. – URL: https://libr.sibsiu.ru/MegaPro/UserEntry?Action=Link_FindDoc&id=91508&idb=0 (0,18 п.л., в т.ч. авторских 0,08 п.л.)*

Свидетельство о государственной регистрации базы данных:

12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020621872. Российская Федерация. Характеристики силуминов

AK5M2 и AK10M2H 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.

Подписано в печать «18» октября 2024 г. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая Усл.печ.л. 1,28 Уч.изд.л. 1,43 Тираж 100 экз. Заказ № 196

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