

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт *Физики высоких технологий*

Направление подготовки *22.04.01 Материаловедение и технологии материалов*

Кафедра *Нанотехнологий и наноматериалов*

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Модификация структуры и свойств силумина эвтектического состава электровзрывным методом

669.71-048.25:621.7.044.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Морозова Надежда Николаевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. НМНТ	Иванов Ю.Ф.	д.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента	Черепанова Н.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ	Раденков Т.А.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Наноматериалов и нанотехнологий	Хасанов О.Л.	Д.т.н., профессор		

Томск – 2017 г.

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов (магистратура)*

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
P1	Осуществлять сбор, анализ и обобщение научно-технической информации в области материаловедения и технологии материалов с использованием современных информационно-коммуникационных технологий, глобальных информационных ресурсов
P2	Работать с патентным законодательством и авторским правом при подготовке документов к патентованию и оформлению ноу-хау
P3	Выполнять маркетинговые исследования и анализировать технологический процесс как объекта управления, разрабатывать технико-экономическое обоснование инновационных решений в профессиональной деятельности
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов, быть готовым к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов, позволяющих получать и диагностировать материалы и изделия различного назначения.
P6	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов
P7	Внедрять системы управления качеством продукции в области материаловедения, эксплуатировать оборудование, позволяющее диагностировать материалы и изделия из них, в том числе наноматериалы
P8	Действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения, выбирать наиболее рациональные способы защиты и порядка в действиях малого коллектива в чрезвычайных ситуациях
P9	Общаться в устной и письменной формах на государственном языке РФ и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности, подготавливать и представлять презентации планов и результатов собственной и командной деятельности, формировать и отстаивать собственные суждения и научные позиции
P10	Самостоятельно осваивать новые методы исследования, изменять научный, научно-педагогический и производственный профиль своей профессиональной деятельности
P11	Применять принципы рационального использования природных ресурсов, основные положения и методы социальные, гуманитарные и экономические подходы при решении профессиональных задач с учетом последствий для общества, экономики и экологии.
P12	Использовать основные категории и понятия общего и производственного менеджмента в профессиональной деятельности

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Физики высоких технологий  
Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
Кафедра Нанотехнологий и наноматериалов

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Хасанов О.Л.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ5Б	Морозова Надежда Николаевна

Тема работы:

Модификация структуры и свойств силумина эвтектического состава  
электровзрывным методом

Утверждена приказом директора ИФВТ	Приказ № _____ от _____
------------------------------------	-------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследования данной работы является силумин эвтектического состава. Поверхность образцов силумина подвергаются электровзрывному легированию порошками оксида иттрия и дополнительному облучению интенсивным электронным пучком. Основными требованиями к модифицированному слою силумина являются высокие твердость и износостойкость.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Изучить литературу по теме магистерской диссертационной работы (сплавы на основе алюминия, силумин, достоинства и недостатки силумина, методы поверхностного легирования, электровзрывное легирование, облучение электронным пучком. Провести комплексное модифицирование образцов эвтектического силумина (электровзрывное легирование и облучение интенсивным электронным пучком).

	Провести исследования элементного и фазового состава, дефектной субструктуры силумина в исходном состоянии и после модифицирования, осуществить механические и трибологические испытания модифицированных образцов.

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
<i>Финансовый менеджмент</i>	<i>Н.В. Черепанова, доцент, кафедра менеджмента, НИ ТПУ</i>
<i>Социальная ответственность</i>	<i>Т.А. Раденков, ассистент, кафедра ЭБЖ, НИ ТПУ</i>
<i>Результаты исследования и их обсуждение</i>	<i>Т.С. Мыльникова, старший преподаватель, каф. ин. языков физико-технического института, НИ ТПУ</i>

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

*Результаты исследования и их обсуждение*

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. НМНТ	Иванов Ю.Ф.	д.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Морозова Надежда Николаевна		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Физики Высоких Технологий  
Направление подготовки 22.04.01 Материаловедение и технологии материалов  
Уровень образования Магистратура  
Кафедра Наноматериалов и Нанотехнологий  
Период выполнения весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
14.04.17	<i>Литературный обзор</i>	25
28.04.17	<i>Выполнение эксперимента</i>	25
16.06.17	<i>Обсуждение результатов и оформление работы</i>	50

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
проф. каф. НМНТ	Иванов Ю.Ф.	д.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
проф. каф. НМНТ	Хасанов О.Л.	д.т.н		

## Содержание

Реферат .....	9
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки .....	11
Введение .....	14
1 Литературный обзор.....	16
1.1 Силумин .....	16
1.1.1 Модифицирование силуминов .....	17
1.1.2 Эвтектические силумины в ГОСТ 1583-93 .....	19
1.1.3 Свойства эвтектических силуминов.....	19
1.1.4 Достоинства/недостатки силумина .....	20
1.1.5 Применение .....	20
1.2 Электровзрывное легирование .....	21
1.3 Высокоскоростная термическая обработка импульсным пучком электронов на установке «СОЛО» .....	25
2 Материал и методы исследования .....	29
2.1 Материал.....	29
2.2 Модифицирование силумина .....	29
2.3 Методы исследования .....	30
2.3.1 Рентгеноструктурный анализ .....	30
2.3.2 Электронная микроскопия.....	33
2.3.2.1 Просвечивающая электронная микроскопия .....	33
2.3.2.2 Сканирующая электронная микроскопия .....	35
2.3.2.3 Метод ионного утонения .....	37
2.3.3 Исследование износостойкости.....	38

2.3.4 Твердость .....	39
3 Результаты исследований и их обсуждение .....	41
3.1 Структура и свойства силумина эвтектического состава в исходном состоянии .....	41
3.2 Структура и свойства силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию .....	46
3.3 Структура и свойства силумина эвтектического состава, подвергнутого ЭВЛ и последующему облучению интенсивным импульсным электронным пучком.....	56
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	65
4.1 SWOT-анализ исследований методом идентификации.....	65
4.2.1 Структура работ .....	69
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	70
4.2.3 Разработка графика выполнения научного исследования .....	70
4.3 Составление сметы научного исследования .....	73
4.3.1 Полная заработная плата исполнителей темы .....	73
4.3.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	75
4.3.3 Накладные расходы.....	75
4.4 Оценка ресурсоэффективности НИР.....	76
5 Социальная ответственность .....	81
5.1 Производственная безопасность .....	81
5.2 Экологическая безопасность .....	90
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. ....	91
5.4 Особенности законодательного регулирования проектных решений.....	92
Заключение .....	95

Список публикаций.....	96
Список используемых источников.....	97
Приложение А Results of the research and their discussion .....	102
Приложение Б Литейные и другие технологические свойства эвтектических силуминов.....	124
Приложение В Физические свойства эвтектических силуминов .....	125
Приложение Г Механические свойства эвтектических силуминов .....	126
Приложение Д Типичные технологические параметры литья эвтектических силуминов .....	127

## РЕФЕРАТ

Диссертация на соискание степени магистра 126 с., 27 рис., 32 табл., 50 источников.

Ключевые слова: силумин, эвтектика, облучение электронным пучком, электровзрывное легирование, поверхностный слой, фазовый состав, элементный состав, структура, микротвердость, износостойкость.

Объектом исследования является силумин эвтектического состава, подвергнутый электровзрывному легированию с использованием порошка оксида иттрия и последующему облучению интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности.

Цель работы – разработка комбинированного метода модифицирования структуры и свойств силумина эвтектического состава.

Изучение фазового и элементного состава, исследование дефектной структуры исходного материала и поверхности модифицирования осуществляли методами оптической (NEOFOT-32), сканирующей (SEM-515 Philips) и просвечивающей (JEM 2100F JEOL) электронной дифракционной микроскопии, рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000, съемка осуществлялась в медном отфильтрованном излучении  $\text{Cu-K}\alpha_1$ ; монохроматор CM-3121). Прочностные свойства силумина характеризовали микротвердостью (прибор ПМТ-3, нагрузка на индентор 0,1 Н). Исследования износостойкости образцов силумина в исходном состоянии и после модифицирования проводили в геометрии диск-штифт (трибометр TRIBOtechnic).

В результате выполненных исследований выявлен режим комбинированной обработки силумина эвтектического состава, позволяющий сформировать в поверхностном слое образцов многофазную субмикронаноразмерную структуру, микротвердость и износостойкость которойкратно превышает соответствующие характеристики силумина исходного состояния.

На данном этапе работы степень внедрения не очевидна.

Области, в которых планируется применять данные разработки: кораблестроение, машиностроение и приборостроение, аэрокосмическая техника.

Экономическая эффективность и менеджмент показали, что итоговые затраты на выполненные исследования составят 87 тысяч рублей. Объемы отчислений в страховые, пенсионные и медицинские учреждения составляют около 10 % от всех затрат.

В дальнейшем планируется продолжить поиски режимов комбинированной обработки силумина эвтектического состава, позволяющих многократно повысить прочностные и трибологические свойства материала.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

Концентрированные потоки энергии – это средства, применяемые для термического воздействия на материалы, в целях проведения технологических операций сварки, термической обработки, резки, скрайбирования, размерной обработки, маркирования, напыления, наплавки и т.д. К числу таких средств относят газовое пламя, электрический разряд, электрическую дугу, пучок электронов, световой луч, поток ионов и т.д. Также существует понятие источников КПЭ. К ним относятся лазеры, плазмотроны, электронно-лучевые установки и т.д [1].

Нанокристаллические материалы - занимают промежуточное состояние между разупорядоченными аморфными и крупнозернистыми материалами. Это поликристаллические материалы, в которых размер зерен не превышает 10 - 40 нм.

Субмикрокристаллические материалы - это материалы с размером зерен меньше 0,5 мкм, обладающие уникальными физико-механическими свойствами: существенно изменяются электрические, магнитные, диффузионные, демпфирующие, значительно повышаются значения прочности и пластичности при низких температурах, снижается температура сверхпластической деформации и др. [2].

Термической (или тепловой) обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твёрдых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счёт изменения внутреннего строения и структуры [3].

Отжиг – вид термической обработки металлов, сплавов, заключающийся в нагреве до определённой температуры, выдержке в течение определенного времени при этой температуре и последующем, обычно медленном, охлаждении до комнатной температуры.

Закалка – вид термической обработки материалов (металлы, их сплавы, стекло), заключающийся в их нагреве выше критической температуры (температуры изменения типа кристаллической решетки, т. е. полиморфного превращения, либо температуры, при которой в матрице растворяются фазы, существующие при низкой температуре), с последующим быстрым охлаждением.

Отпуск – технологический процесс, заключающийся в термической обработке металла, при которой основными процессами являются распад мартенсита, а также полигонизация и рекристаллизация.

Модификация структуры (модифицирование металлов и сплавов) - это введение в расплавленные металлы и сплавы модификаторов, небольшие количества которых резко влияют на кристаллизацию, например, вызывают формирование структурных составляющих в округлой или измельченной форме и способствуют их равномерному распределению в основной фазе. В результате модифицирования сплавы приобретают более тонкую структуру, что улучшает их механические свойства [4].

Легирование – добавление в состав материалов примесей для изменения (улучшения) физических и/или химических свойств основного материала. Легирование является обобщающим понятием ряда технологических процедур, различают объёмное (металлургическое) и поверхностное (ионное, диффузное и др.) легирование [5].

Электровзрывное легирование - это способ модификации структуры и свойств поверхностных слоёв металлов и сплавов с целью их упрочнения. Оно осуществляется путём электрического взрыва проводников, формирования импульсных многофазных плазменных струй, оплавления ими поверхности и насыщения расплава продуктами взрыва с последующей самозакалкой и образованием новых упрочняющих фаз [6].

Сплав - макроскопический однородный металлический материал, состоящий из смеси двух или большего числа химических элементов с преобладанием металлических компонентов [7].

Алюминий - это легкий и пластичный белый металл, матово-серебристый благодаря тонкой оксидной пленке, которая сразу же покрывает его на воздухе. 13-й элемент периодической таблицы Менделеева. Невероятно, но факт: алюминий – самый распространенный металл на Земле, на него приходится более 8% всей массы земной коры, и это третий по распространенности химический элемент на нашей планете после кислорода и кремния [8].

Кремний - химический элемент IV группы периодической системы, атомный номер 14, неметалл. Кремний - второй после кислорода по распространенности на Земле элемент, содержание в земной коре 27,6% по массе. Один из основных полупроводниковых материалов в электронике, восстановитель при металлотермическом получении металлов, компонент сталей, чугунов и других сплавов [9].

Силумин – силуминами называют группу алюминиевых сплавов с относительно большим содержанием кремния. Часто под силуминами подразумевают более узкую группу сплавов с содержанием кремния 12-13 %.

Эвтектика - смесь двух или более твердых фаз, одновременно кристаллизовавшихся из расплава, характеризующегося постоянной температурой кристаллизации и составом [10].

Микротвердость – это твердость отдельных фаз и структурных составляющих, твердость внутри отдельных зерен, тонкого поверхностного слоя (после химико – термической обработки), тонких листов и фольги [11].

Износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания [12].

Коэффициент трения – количественная характеристика силы, необходимой для скольжения или движения одного материала по поверхности другого [13].

## ВВЕДЕНИЕ

Создание материалов с высокими служебными характеристиками было и будет постоянной проблемой материаловедов и металлофизиков. Это обусловлено, в частности тем, что создание сложной дорогостоящей установки или прибора, в которых используется разрабатываемый материал, существенно повышает требования к ресурсоэффективности и экономическим показателям. Как правило, эксплуатация деталей, машин и механизмов сопровождается, в первую очередь, изменением структуры и свойств поверхностного слоя материала. При низком уровне эксплуатационных характеристиках поверхностного слоя использование материала экономически не оправдано.

Силумин – литейный сплав алюминия и кремния. Присутствие кремния в алюминии приводит к повышению многих характеристик алюминия (твердость, износостойкостью, литейные свойства и т.д.). Твердость силумина напрямую определяется концентрацией в нем кремния. Однако при концентрации кремния, превышающей эвтектические значения (11-13 вес. %), в силумине отмечаются пониженные литейные свойства, слитки характеризуются наличием крупных включений кремния, пор, трещин, что снижает эксплуатационные свойства материала и существенно сужает сферу применения силумина в промышленности.

Перспективным методом повышения служебных характеристик силуминов (наряду с увеличением концентрации кремния) является комбинированная обработка, сочетающая электровзрывное легирование и последующее облучение интенсивным импульсным электронным пучком, что позволяет не только осуществить термическое воздействие на поверхность материала, но и выполнить легирование поверхностного слоя толщиной десятки-сотни микрометров. Рассмотренный комбинированный метод позволяет модифицировать элементный и фазовый состав, дефектную

субструктуру материала и дает возможность существенным образом повысить механические и трибологические свойства силуминов.

Цель работы – разработка комбинированного метода модифицирования структуры и свойств силумина эвтектического состава, сочетающего электровзрывное легирование порошками оксида иттрия и последующее облучение легированного слоя интенсивным импульсным электронным пучком.

Новизна работы обусловлена тем, что используемая в работе установка электронно-пучкового модифицирования по совокупности параметров превосходит известные в России аналоги.

Результаты исследований могут быть использованы в областях промышленности, где требуются материалы с высокими служебными характеристиками: авиация, космонавтика, машиностроение, судостроение и т.д.

Результаты, полученные в работе, были представлены: на VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (Юрга, 18–20 мая 2017 г.) и VI Международной научной конференции для молодых ученых «Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы» (Саратов, 15 - 16 мая 2017 года).

Доклад, представленный на VI Международной научной конференции для молодых ученых «Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы» (Саратов, 15 - 16 мая 2017 года), по результатам конкурсного отбора получил **Гран-при** конференции.

Результаты проведенных научных исследований опубликованы в трудах VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» - Юрга, 18–20 мая 2017 г. и VI Международной научной конференции для молодых ученых «Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы» (Саратов, 15 - 16 мая 2017 года).

На данном этапе исследований внедрение результатов работы не очевидно.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Для выполнения исследования необходимо было провести литературный анализ по трем направлениям:

1. Силумины
2. Электровзрывное легирование
3. Высокоскоростная термическая обработка импульсным пучком электронов на установке «СОЛО»

Выбор первого подраздела обуславливается тем, что нужно изучить материал, с которым будет проведена работа. Второй подраздел для изучения метода, а именно преимущества и недостатки. Третий подраздел позволил изучить уже существующие эксперименты, чтобы иметь представление о том, какое воздействие может оказывать высокоскоростная термическая обработка, и как она может изменять структуру и свойства материала.

## 1.1 Силумин [14]

Силуминами называют группу алюминиевых сплавов с относительно большим содержанием кремния. Часто под силуминами подразумевают более узкую группу сплавов с содержанием кремния 12-13 %. Это – эвтектические силумины, которые также называют обычными или нормальными силуминами.

Бывают также:

- доэвтектические силумины (с содержанием кремния 4-10 % с добавками меди, магния и марганца),
- износостойкие заэвтектические силумины (с содержанием кремния до 20 % с добавками меди, магния и никеля)
- специальные силумины, например, цинковистый силумин.

Эвтектические силумины имеют содержание кремния в интервале от 10 до 13 %, умеренные прочностные свойства, но довольно высокое для литейных

сплавов удлинение. Главное их преимущество перед другими литейными алюминиевыми сплавами, в том числе и другими типами силуминов — очень хорошие литейные свойства и, в первую очередь — высокая жидкотекучесть. Эти литейные сплавы очень хорошо подходят для литья тонкостенных, сложных по форме, герметичных, стойких к вибрации и ударным нагрузкам изделий.

Из всех алюминий-кремниевых сплавов эти сплавы, содержащие около 13 % кремния, имеют самую лучшую жидкотекучесть, и свои технологические особенности.

В случае свободного затвердевания эти сплавы образуют плотную, колоколообразную поверхность на верхней части слитка. При этом типе затвердевания кристаллизация начинается с формирования твердой оболочки, которая затем растет вглубь отливки. У этого типа сплава имеется только два состояния — «твердое» и «жидкое». Полное затвердевание отливки происходит при эвтектической температуре около 577 С.

### **1.1.1 Модифицирование силуминов**

Эвтектические силумины могут быть модифицированы натрием. Модификацию натрием обычно применяют при литье в песчаные формы и литье в кокиль, если к отливкам предъявляются повышенные требования к удлинению литой микроструктуры. Как правило, литейные сплавы для литья в песчаные формы и литья в кокиль всегда применяют в модифицированном химическом составе.

Химическая стойкость, а также стойкость к воздействию атмосферы, в том числе, морской, повышается с повышением чистоты применяемого сплава. Поэтому в таких областях применения как пищевая промышленность или судостроение применяют только первичные алюминиевые сплавы. Удлинение литой микроструктуры в значительной степени зависит от содержания железа и других примесей. Поэтому, для того, чтобы гарантировано получать высокие

прочностные характеристики отливок, применяют только первичные сплавы с минимальным содержанием железа и других примесей.

Химический состав литейных алюминиевых сплавов задают два европейских стандарта:

- EN 1676 — для литейных алюминиевых сплавов *в чушках*
- EN 1706 — для литейных алюминиевых сплавов *в отливках*.

Основные эвтектические силумины по стандартам EN 1676 и EN 1706 представлены в таблице 1. В стандартах EN 1676 и EN 1706 и к цифровому обозначению, и к химическому обозначению сплава добавляются «приставки» EN AB- и EN AC-, соответственно.

Например, для сплава 44200 это выглядит так:

EN AB-44200 и EN AC-44200;

EN AB-Al Si12(a) и EN AC Al Si12(a).

Таблица 1.1 - Химический состав эвтектических силуминов по EN 1676 и EN1706

Химический состав, %												
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
AlSi12(a)	Min	10.5										
	Max	13.5	0.40	0.03	0.35				0.10			0.15
AlSi12(b)	Min	10.5										
	Max	13.5	0.55	0.10	0.55	0.10		0.10	0.15	0.10		0.15
AlSi12(Fe)(a)	Min	10.5	0.45									
	Max	13.5	0.9	0.08	0.56				0.15			0.15
AlSi12(Fe)(b)	Min	10.5	0.45									
	Max	13.5	0.9	0.18	0.55	0.40			0.30			0.15
AlSi12(Cu)	Min	10.5			0.05							
	Max	13.5	0.7	0.9	0.56	0.35	0.10	0.30	0.55	0.20	0.10	0.15
AlSi12Cu1(Fe)	Min	10.5	0.6	0.7								
	Max	13.5	1.1	1.2	0.55	0.35	0.10	0.30	0.55	0.20	0.10	0.15

Эти стандарты разрешают очень широкий интервал главного легирующего элемента кремния — от 10,5 до 13 %. Практический интервал содержания кремния составляет от 12,5 до 13,5 %, а также слегка

доэвтектический интервал от 10,5 до 11,2 %. Важно, что сплавы из этих двух интервалов проявляют совершенно различное поведение при затвердевании. При промежуточном интервале содержания кремния от 11,5 до 12,5 % существует большой риск образования усадочной пористости. Поэтому применение сплавов в этом интервале не рекомендуется.

### **1.1.2 Эвтектические силумины в ГОСТ 1583-93 [15]**

ГОСТ 1583-93 определяет требования для обоих типов алюминиевых литейных сплавов: и в чушках, и в отливках.

Все силумины в чушках имеют состав по кремнию близкий к эвтектическому – от 10 до 13 %.

По возрастанию содержания железа (и других примесей) силумины в чушках (из бывшего ГОСТ 1521-68) располагаются в следующем порядке:

- АК12оч (СИЛ-00) – содержание железа до 0,20 %;
- АК12пч (СИЛ-0) – содержание железа до 0,35 %;
- АК12ч (СИЛ-1) – содержание железа до 0,50 %;
- АК12ж (СИЛ-2) – содержание железа до 0,7 %.

Из сплавов, которые применяются и в чушках, и в отливках, к эвтектическим силуминам относится сплав АК12 (АЛ2). Допустимое содержание железа в этом сплаве зависит от типа изделия (чушка или отливка), а также метода литья. При литье в песчаные формы и по выплавляемым моделям допустимое содержание железа должно быть не более 0,7 %, а при литье под давление – не более 1,5 %.

### **1.1.3 Свойства эвтектических силуминов**

Технологические, физические и механические свойства эвтектических силуминов, а также типичные технологические параметры их литья представлены в приложениях Б, В, Г и Д.

### 1.1.4 Достоинства/недостатки силумина [16]

Литейные алюминиевые сплавы имеют ряд особенностей.

Достоинства:

- повышенную жидкотекучесть, обеспечивающую получение тонкостенных и сложных по конфигурации отливок;
- сравнительно невысокую линейную усадку;
- пониженную склонность к образованию горячих трещин.

Недостатки:

Обладают высокой склонностью:

- к окислению;
- к насыщению водородом,

что приводит к таким видам брака отливок, как газовая пористость, шлаковые включения и оксидные включения.

Поэтому при разработке технологии плавки и изготовлении фасонных отливок любым из способов литья необходимо учитывать особенности отдельных групп алюминиевых сплавов. Наибольшее распространение в промышленности имеют сплавы Al—Si, Al—Si—Mg (АК12, АК9ч, АК9пч, АК7ч, АК7пч, АК8л, АК9, АК7), которые отличаются хорошими технологическими свойствами.

### 1.1.5 Применение [16]

Из сплава АК12 (эвтектический) изготавливают малонагруженные детали (приборов, агрегатов и двигателей, бытовых изделий) литьем в песчаные формы, кокиль, под давлением, в оболочковые формы и по выплавляемым моделям. Получаемые отливки плотны, герметичны, имеют концентрированную усадочную раковину.

Простой силумин марки АК12 благодаря эвтектической структуре имеет отличные литейные свойства (наиболее высокую жидкотекучесть среди всех

алюминиевых сплавов) при невысоких механических свойствах. Из сплава получают плотные герметичные отливки сложной формы, не испытывающие в процессе эксплуатации значительных нагрузок.

## 1.2 Электровзрывное легирование

Поверхностное легирование — это один из наиболее эффективных способов упрочнения и защиты поверхности конструкционных и инструментальных сталей и сплавов. Его применение в ряде случаев позволяет отказаться от разработки и использования новых высокопрочных материалов. Вместе с тем, методы традиционной химико-термической обработки в силу их высокой энергоёмкости и длительности экономически оправдывают себя только в условиях массового производства [17].

Метод электровзрывного легирования – это метод, в котором мы подаем большое напряжение на очень тонкую токопроводящую пластинку, в результате чего она взрывается, т.е. устраиваем своеобразное короткое замыкание. В результате взрыва большая часть материала переходит в состояние плазмы, меньшая – формирует мелкие (субмикро- и наноразмерные) капли расплавленного и застывшего материала. Сформированный таким образом поток вещества, обладающий большой энергией, направляется на обрабатываемый образец. Варьируя параметры работы электровзрывной установки, можно с помощью налетающего потока вещества нагревать поверхность образца вплоть до плавления. Элементы плазмы, формирующей передний фронт потока (потому что она легкая) внедряются в поверхностный слой образца (научный термин – легирует), изменяя его элементный состав, и, тем самым, его служебные характеристики [18].

При обработке твёрдосплавных пластин данным методом не образуется резкой границы между легированным поверхностным слоем и материалом основы. Результаты испытаний облучённой поверхности показали, что её

твёрдость, в сравнении с необработанными образцами, увеличивается в 1,5 – 2 раза, при этом сохраняется исходная шероховатость поверхности, глубина упрочнённых слоёв достигает 20 – 25 мкм [19].

Электронно-микроскопические исследования показали, что после различных видов одно- и двухкомпонентного ЭВЛ формируется зона легирования с нанокompозитной структурой, состоящая из четырех характерных слоев, закономерно связанных друг с другом (рис. 1.1). Тонкий (около 1 мкм) приповерхностный нанокompозитный слой (рис. 1.2). Его фазовый состав образован частицами синтезируемых фаз с размерами кристаллитов порядка 1–10 нм. 2. Промежуточный слой с ячеистой кристаллизацией. Диаметр ячеек в нем с глубиной увеличивается, а разделяющих их прослоек уменьшается. Размер кристаллитов в прослойках составляет величину порядка 10 нм. 3. Приграничный слой с зеренной структурой, внутри зерен которого с размером порядка 10–100 нм наблюдаются частицы упрочняющих фаз с размером порядка 1 нм. 4. Тонкий (1–2 мкм) нанокристаллический слой с низкой степенью легирования на границе с основой. Размеры кристаллитов материала основы в нем составляют 30–40 нм, а частиц упрочняющих фаз – 3–5 нм [20].

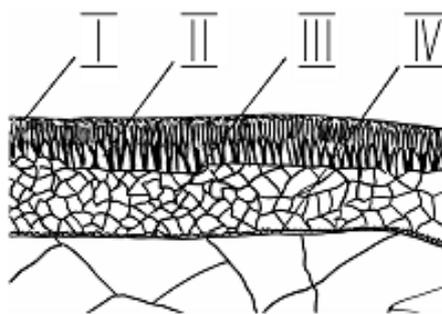


Рисунок 1.1 – Схема строения зоны легирования по глубине: I – приповерхностный слой, II – промежуточный, III – приграничный, IV – нанокристаллический подслой [20]

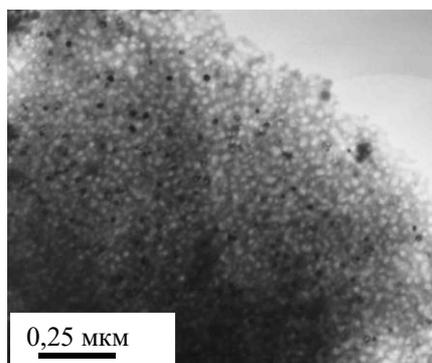


Рисунок 1.2 – Структура приповерхностного нанокристаллического слоя зоны электровзрывного меднения никеля [20]

Показано, что обработка поверхности с плавлением и насыщением поверхностных слоев инструментальной стали X12 компонентами многофазной струи, сформированной электровзрывом алюминиевой фольги с порошковой навеской ультрадисперсного порошка карбида кремния, позволяет получить зону легирования толщиной 20 мкм. При этом обработка приводит к незначительному уменьшению массы образцов. Микротвердость поверхности в результате обработки увеличилась в 2,8 раза, а абразивная износостойкость – в 8 раз. Жаростойкость в атмосфере воздуха возросла в 9; 3,5 и 2 раза при температуре испытаний 800; 850 и 900 °С соответственно [21].

Не смотря на все положительные стороны данного метода, он не совершенен. При обработке, т.к. мелкие капли долетают до образца в последнюю очередь и формируют на его поверхности неоднородное по толщине покрытие с большим количеством трещин и кратеров. Несложно понять, что такая поверхность никому не нужна, даже учитывая то, что она стала прочнее исходной примерно в 3-4 раза, поэтому более 50% упрочненного слоя удаляется (сошлифовывается, стравливается в кислотах), а это ни что иное как потеря зачастую дорогостоящего легирующего материала. Одновременно с выравниванием поверхности образца (часто это очень трудоемкая, экологически грязная операция) уменьшается толщина модифицированного слоя, что снижает значение выполняемой работы [18].

Исходя из изученной литературы можно сделать вывод, что ЭВЛ является отличным методом для легирования поверхности, но из-за его главного недостатка является невыгодным, поэтому добавляем вторую ступень обработки, чтобы не терять легирующий элемент, за счёт модифицирования поверхности.

#### Установка для электровзрывного легирования

Электровзрывное легирование проводится на лабораторной установке ЭВУ 60/10 (рис.1.3).

Конструктивно она состоит из трех основных частей зарядного устройства, в который входят автотрансформатор, повышающий трансформатор и выпрямитель; емкостного накопителя энергии; плазменного ускорителя. Установка работает в ручном режиме – ее заряд и разряд выполняют нажатием соответствующих кнопок на выносном пульте управления. Защиту установки от превышения задаваемого зарядного напряжения и от несрабатывания позволяет осуществлять разряд на короткозамыкатель, а остаточный заряд снимают изолирующей штангой.

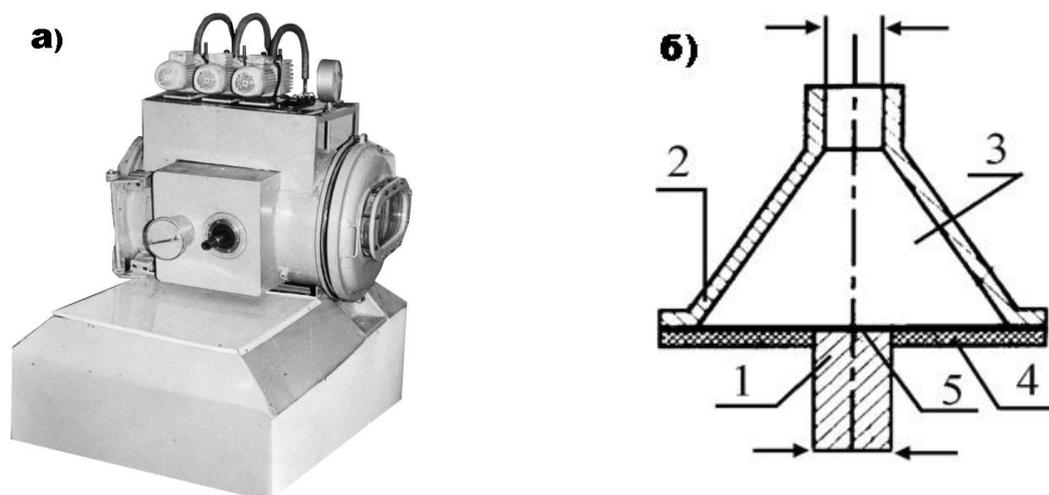


Рисунок 1.3 – а) внешний вид установки б) схема импульсного плазменного ускорителя: 1-внутренний электрод, 2-внешний электрод, 3-компрессионная камера; 4-изолирующая подставка; 5-взрываемый проводник.

Батарея заряжается от сети за время  $t_3$ , в течение которого в ней потребляется средняя мощность  $P_3 = W/t_3$ , где  $W = 0,5Cu$  – накапливаемая энергия,  $C$  – суммарная емкость батареи,  $U$  – зарядное напряжение.

Разряд на взрываемый проводник происходит за время  $t_p \ll t_3$  при отключенном коммутаторе зарядного устройства через дуговой разрядник, приведенный в рабочее состояние. При этом в плазменном ускорителе выделяется разрядная мощность  $P_n = \eta_p W/t_p$ , где  $\eta_p$  – КПД разрядного контура.

С целью многократного увеличения отношения  $P_n/P_3$  в установке применены импульсные конденсаторы, способные отдавать накопленную энергию в виде коротких импульсов большой мощности. Конструкция конденсаторов обеспечивает возможность их длительной работы в режиме, близком к режиму короткого замыкания

Основные параметры установки: энергоемкость, 60 кДж, собственная частота разряда, 10 кГц, максимальное значение заряда, 5 кВ, дискретность регулирования напряжения заряда, 0,1 кВ, максимальная производительность при максимальном напряжении заряда, 10 цикл/ч, средняя потребляемая мощность при заряде не более 0,55 кВт [22].

### **1.3 Высокоскоростная термическая обработка импульсным пучком электронов на установке «СОЛО»**

Последующая обработка поверхности ЭВЛ высокоинтенсивным электронным пучком приводит к снижению степени шероховатости поверхности упрочнения и к выравниванию толщины упрочняемого слоя. Толщина упрочняемого слоя после ЭПО изменяется в пределах 20-50 мкм и уменьшается с ростом плотности энергии пучка [23].

Также из изученной литературы известно, что при электронно-пучковой обработке формируется многофазная структура, состав которой определяется плотностью энергии пучка электронов, это можно понять, проанализировав результаты, представленные в табл.1.2

Таблица 1.2 – Фазовый состав поверхностного слоя системы пленка (кремний)/подложка (BT1-0), обработанной высокоинтенсивным электронным пучком [24]

Плотность энергии пучка электронов, Дж/см <sup>2</sup>	a-Ti, %	w-Ti, %	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	TiSi <sub>2</sub>
20	30	11	58	1
30	45	18	33	4
40	41	24	35	0,0

Основываясь на исследованиях поведения микротвердости поверхности после электронно – пучковой обработки [23-27]. В результате выявлено повышение твердости поверхностного слоя образцов. При оптимальном режиме облучения (для каждого материала он свой) твердость поверхности облучения увеличивается в ~1,5-10 раз.

Благодаря изученной литературе было выявлено, что повторная обработка может снизить твёрдость. Дополнительное облучение электронным пучком системы покрытие / подложка с целью сплавления покрытия в подложку приводит к снижению (2,5...4 раза) твёрдости покрытия, что может быть обусловлено изменением его структуры и элементного состава, и формированию нескольких подслоёв с повышенным значением твёрдости и модуля Юнга [27].

#### Установка «СОЛО»

Установка предназначена для исследования генерации электронного пучка микросекундной длительности (длительность импульсов до 200 мкс), его транспортировки в продольном магнитном поле и воздействия пучком на твердые тела. В стенде используется электронный источник, который является научным электротехническим оборудованием, предназначенным для генерирования электронного пучка с энергией 5-25 кэВ, длительностью 20-200 мкс. Источник рассчитан на эксплуатацию в лабораторных условиях при

температуре воздуха от плюс 10 до плюс 35°С, относительной влажности не более 80% при +25 °С.

На Стенде могут проводиться работы и научные исследования по генерации плотных электронных пучков и изучению их взаимодействия с твердыми телами.



Рисунок 1.4 – внешний вид установки «СОЛО»

Конструктивно установка состоит из трех модулей:

1) Стойка управления и контроля, включающая управляющий компьютер и специализированные контроллеры. Работа с управляющей программой персонального компьютера возможна как с помощью клавиатуры и манипулятора мышь, так и с использованием сенсорного экрана, при нажатии на соответствующие элементы установки, отображаемые на экране

монитора. Текущее состояние установки отображается на трехцветном световом индикаторе, установленном над установкой.

2) Блок, включающий вакуумную камеру с системой вакуумной откачки и манипулятором, электронный источник, вертикально установленный на верхней стенке камеры и накопительные емкости высоковольтного источника ускоряющего напряжения (расположены позади электронного источника).

3) Стойка с блоками питания импульсного электронного источника. Управление БП пушки возможно как под управлением программы на ПК, так и в автономном режиме (непосредственно с панели контроллера БП).

## 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Материал

Материалом исследования являлся силумин типа АК12. Образцы имели форму пластин с размерами (10x10x5) мм. Элементный состав образцов исследования представлен в таблице 3.

Таблица 2.1 – Результаты рентгеноспектрального анализа элементного состава силумина типа АК12 (вес. %, Al-остальное)

Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Mn	Ti	Cr
11.1	0.58	2.19	0.92	0.25	0.029	0.047	0.005

### 2.2 Модифицирование силумина

Модифицирование силумина осуществляли комбинированным методом, сочетающем электровзрывное легирование (ЭВЛ) (СибГИУ, г. Новокузнецк) и последующее облучение интенсивным импульсным электронным пучком (ИСЭ СО РАН). Электровзрывное легирование выполняли на установке лабораторного типа ЭВУ 60/10. С этой целью на поверхность фольги алюминия помещали порошок оксида иттрия  $Y_2O_3$ . Фольга с насыпанным порошком помещалась в установку для ЭВЛ. При пропускании через фольгу импульса электрического тока фольга взрывалась. Сформировавшаяся при этом плазма и не разрушившиеся частицы порошка попадали на поверхность образца силумина. Это приводило к плавлению некоторого поверхностного слоя образца и внедрению в него элементов плазмы и частиц порошка. Режим ЭВЛ приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Режим обработки силумина методом ЭВЛ

№ образца	m (Al), г фольга	m (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), г порошок	U, кВ	
1	0,0589	0,05890	2,6	
2	0,0589	0,05890	2,8	
3	0,0589	0,02945	2,6	
4	0,0589	0,02945	2,8	
5	0,0589	0,08830	2,6	
6	0,0589	0,08830	2,8	

### 2.3 Методы исследования

Исследования фазового состава и состояния кристаллической решетки силумина осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония). Исследование элементного и фазового состава, дефектной субструктуры силумина осуществляли методами сканирующей (прибор Philips SEM 515, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F, JEOL, Япония) электронной микроскопии. Фольги (объект исследования материала методами просвечивающей электронной микроскопии) изготавливали методами ионного утонения тонких (100 мкм) пластинок на приборе Ion Slicer EM 09100IS. Механические свойства модифицированного слоя оценивали, определяя твердость при нагрузке на индентор 0,5 Н (микротвердомер ПМТ-3) и 50 мН (ультрамикротвердомер Shimadzu DUH-211S).

#### 2.3.1 Рентгеноструктурный анализ

Рентгеноструктурный анализ основан на явлении интерференции рентгеновских лучей, отраженных от атомных плоскостей кристалла. Этот метод позволяет изучить фазовый состав сплава, определить степень

совершенства кристаллов, их ориентировку, определить оптимальные режимы технологии изготовления и обработки разнообразных кристаллических материалов.



Рисунок 2.1 - Дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония

Таблица 2.3 – Основные технические характеристики дифрактометра XRD-7000s, Shimadzu, Япония

		<b>XRD -7000, 2 кВт</b>	<b>XRD -7000, 3 кВт</b>
<b>Рентгеновская трубка</b>	Материал и тип анода	Cu , Mo , Co , Fe , Cr , W на выбор, нормальный фокус	Cu , Mo , Co , Fe , Cr на выбор, широкий или линейный фокус
	Размеры фокуса	1,0 x 10 мм	2,0 x 12 мм
	Максимальная мощность	2 кВт	3 кВт
<b>Рентгеновский генератор</b>	Максимальная мощность	3 кВт	
	Максимальные параметры работы	60 кВ - 80 мА	
	Защита трубки	Защита от превышения мощности, перегрузок по току и напряжению, перебоев водоснабжения	
	Механизмы защиты	Механизм блокировки двери, аварийный стоп	
	Тип	Вертикальный (тета-татеа)	
	Радиус гониометра	275 мм стандартный (может меняться от 200 до 275 мм)	

Продолжение таблицы 2.3

Размеры образца максимальные	400 мм x 550 мм x 400 мм
Автосамплер	5 позиций (опция)
Минимальный шаг сканирования	0,0002 градуса (2тета), 0,0001 градуса (тета)
Режимы работы	Непрерывное сканирование, пошаговое сканирование, калибровка, позиционирование, осцилляция по оси тета
Скорость сканирования	-0,1~ 50 градусов/мин (тета s, тета d), -0,1~ 100 градусов/мин (2тета)

Целью рентгеноструктурного анализа является установление соответствия между атомной структурой исследуемого образца и пространственным распределением рентгеновского излучения, рассеянного образцом. Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны с длиной  $\lambda$  в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $10^{-12}$  м или от 1 до 0.001 нм. Такой же порядок величины имеют атомы и межатомные расстояния в твердых телах и жидкостях, поэтому о рассеянии рентгеновского излучения на веществе можно говорить как о дифракции. При этом решение прямой задачи – определения дифракционной картины по известному расположению атомов в образце – является хотя и сложной, но разрешимой проблемой, тогда как решение обратной задачи – восстановления расположения атомов в рассеивающем объекте по распределению дифрагированной интенсивности – наталкивается на ограничения фундаментального характера. Все развитие рентгеноструктурного анализа связано с попытками обойти эти фундаментальные ограничения, попытками вполне успешными, о чем свидетельствует множество расшифрованных структур. Разработаны различные методы и подходы к решению задач структурного анализа, феноменологические описания, допуски и упрощения, позволяющие сформулировать начальное приближение и далее последовательно уточнять структуру. Кроме того, исследование взаимодействия рентгеновского излучения с веществом дает возможность

оценить не только структурные характеристики образца, но и некоторые субструктурные параметры [28].

### **2.3.2 Электронная микроскопия**

В электронном микроскопе вместо света для построения изображения используют поток электронов в вакууме.

В качестве «линз», фокусирующих электроны, служит электромагнитное поле, создаваемое электромагнитными катушками. Изображение в электронном микроскопе наблюдают на флюоресцирующем экране и фотографируют. Объекты при электронной микроскопии находятся в глубоком вакууме, поэтому подвергаются фиксации и специальной обработке.

Кроме того, они должны быть очень тонкими, так как поток электронов сильно поглощается объектом. В связи с этим в качестве объектов используют ультратонкие срезы толщиной 20—50 нм, помещенные на тончайшие пленки. Разрешающая микроскопов значительно выше чем световых и достигает 1,5 А (0,15 нм), что позволяет получить полезное увеличение в миллионы раз.

Наиболее широко применяются просвечивающая (трансмиссивная) и сканирующая электронная микроскопия [28].

#### **2.3.2.1 Просвечивающая электронная микроскопия**

Принцип действия просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) несложен. Оптическая схема электронного микроскопа просвечивающего типа аналогична схеме обычного светового микроскопа: Конденсорная линза «освещает» узким пучком электронов объект, изображение которого с помощью двух систем электронных линз – объективной и проекционной – в увеличенном масштабе переносится на конечный экран. Проходя через объект, расположенный вблизи апертурной диафрагмы объективной линзы, электроны взаимодействуют с атомами объекта и отклоняются от первоначального

направления падения пучка, т.е. рассеиваются (поглощение электронов в объектах, вследствие их очень малой толщины, в большинстве случаев можно пренебречь). При этом у части электронов скорость меняется только по направлению, не меняясь по величине, что соответствует упругому рассеиванию. Скорость другой части электронов меняется и по направлению, и по величине, при этом часть энергии электронов затрачивается на ионизацию и возбуждение атомных электронов в объекте. Вследствие этого электроны, пройдя через объект, после рассеяния в нем имеют вид расходящегося пучка. При этом электроны, рассеянные на угол, больший апертурного угла объективной линзы, определяемого диаметром апертурной диафрагмы и ее геометрическим положением, поглощаются в толще материала этой диафрагмы, и в дальнейшем в формировании изображения, возникающего на экране, принимает участие только та часть рассеянных электронов, которая прошла через диафрагму. Таким образом, чем большей рассеивающей способностью обладает некоторый участок исследуемого объекта, тем более темным будет его изображение.



Рисунок 2.2 – Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100F, JEOL, Япония

Таблица 2.4 – Основные технические характеристики просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F, JEOL, Япония

Ускоряющее напряжение	80. 100. 120. 160. 200 кВ
Разрешение по точкам	0.19 нм
Разрешение по решетке	0.14 нм

Продолжение таблицы 2.4.

Диаметр пятна	в просвечивающем режиме	20 - 200 нм
	в режиме сходящегося пучка	0.5 - 25 нм
Увеличение	в режиме низкого увеличения	x 50 – 6 000
	в режиме увеличения	x2 000 - 1 500 000
	в растровом режиме	x 8 000 - 800 000
Углы наклона образца X/Y		$\pm 25^\circ/\pm 25^\circ$
Размеры матрицы CCD камеры		<b>24</b> м x 36 мм (4032 x 2688 pixel)

### 2.3.2.2 Сканирующая электронная микроскопия

Сканирующий электронный микроскоп — это прибор, предназначенный для получения увеличенного изображения объекта путем сканирования по объекту сфокусированным пучком электронов и регистрации детектором сигнала, возникающего в результате взаимодействия электронов с веществом.

В сканирующем электронном микроскопе пучок электронов с первичной энергией ~1-10 кэВ фокусируется системой линз в пятно диаметром 1-10 нм на поверхности исследуемого образца. Сфокусированный пучок сканируется по поверхности с помощью системы отклоняющих катушек синхронно с электронным пучком в видеотрубке, которая используется в качестве оптического дисплея. Оба электронных пучка управляются одним и тем же генератором сканирования, поэтому увеличение просто равно отношению размеров дисплея и сканируемой области на поверхности образца. В сканирующем электронном микроскопе используется детектирование различных сигналов, включая вторичные электроны, обратно рассеянные электроны, рентгеновское излучение и ток через образец [30].



Рисунок 2.3 - Растровый электронный микроскоп Philips SEM 515

Таблица 2.5 – Основные технические характеристики растрового электронного микроскопа Philips SEM 515

диапазон ускоряющего напряжения и тока пучка	3—30 кВ
разрешение	до 10 нм (при ускоряющем 30 кВ)
минимальное увеличение	~ 20 крат
глубина резкости (соответствующая предельному разрешению человеческим глазом элементов конечного изображения (0,2 мм))	порядка 0,5 от его линейных размеров
анализируемые элементы	начиная от Фтора
предел обнаружения	0,2 вес.% (зависит от набора анализируемых элементов)
предельная точность определения концентрации	~ 5%
пространственное разрешения микроанализа	1,0×1,0×5,0 мкм

### 2.3.2.3 Метод ионного утонения

Фольги (объект исследования материала методами просвечивающей электронной микроскопии) изготавливали методами ионного утонения тонких (100 мкм) пластинок на приборе Ion Slicer EM 09100IS.



Рисунок 2.4 - приборе Ion Slicer EM 09100IS

Система Ion Slicer EM-09100IS предназначена для подготовки образцов к исследованиям в растровых и просвечивающих электронных микроскопах путем ионного утонения, без применения растворителя или химических реактивов.

Отличительной особенностью данного прибора является то, что он не требует приготовления диска, утоненного в центре. Предварительная пробоподготовка для Ion Slicer заключается лишь в изготовлении параллелепипеда размерами 2.8мм x 0.5мм x 0.1мм, который затем закрывается специальной защитной лентой и утоняется пучком ионов аргона. Энергия пучка не превышает 8 кВ, а угол падения можно варьировать от 0 до 6 по отношению к наибольшей грани образца. Это позволяет минимизировать радиационные повреждения и, тем самым, сохранить исходные структуру и фазовый состав образца, а после этого изучить их методами электронной микроскопии.

Процедура пробоподготовки включает в себя следующие шаги:

- 1) Отрезка образца. ( От исследуемого объекта должен быть отрезан образец длиной 2.8 мм и шириной 0.8 мм.)

2) Утонение образца. ( На следующем этапе требуется утонение образца до толщины 0.1 мм. Для полировки можно использовать маленькое двухстороннее лезвие. Показателем того, что образец утоньшился до 0.1 мм и полировку можно останавливать, будет исчезновение окраски на лезвии.)

3) Ионное утонение.

После того, как образец приведен к размерам 2.8 мм длины, 0.8 ширины и 0.1 толщины, он помещается в держатель и запускается процесс травления. Длительность травления, в среднем, составляет около двух часов и зависит от условий, в которых проводится обработка.

Процесс утонения контролируется по изображению, получаемому с CCD-камеры, и управляется при помощи персонального компьютера.

Ion Slicer крайне эффективен для обработки мягких материалов, неоднородных твердых растворов, минералов, композитов, керамик, пористых структур и т.п.

### **2.3.3 Исследование износостойкости**

Исследования коэффициента трения и скорости износа поверхностного слоя проводили в геометрии диск-штифт с помощью трибометра TRIBOtechnic, в качестве контр тела использовали шарик.

Схема диск-шарик:

1. Берётся исходный материал и обработанный
2. Закрепляется на предметном столике
3. Сверху ставится шарик с нагрузкой
4. Вращается образец
5. Затем с течением определённого времени проводятся секущие, высчитывается площадь, а затем где площадь и глубина больше, тем выше скорость износа, коэффициент трения.

### 2.3.4 Твердость

Твердость поверхностного легированного слоя на различных этапах электронно-ионно-плазменного воздействия определяли при нормальных нагрузках на индентер 0,5 Н (микротвердомер ПМТ-3).

Мы определяли микротвёрдость. Метод измерения микротвердости регламентирован ГОСТ 9450. Определение микротвердости (твердости в микроскопически малых объемах) проводят при исследовании отдельных структурных составляющих сплавов, тонких покрытий, а также при измерении твердости мелких деталей. Прибор для определения микротвердости состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды под небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа. В испытываемую поверхность вдавливают алмазную пирамиду под нагрузкой 0,05...5 Н.

Микротвердость измеряют путем вдавливания в образец (изделие) алмазного индентора под действием статической нагрузки в течение определенного времени выдержки. Число твердости определяют (как и по Виккерсу) делением приложенной нагрузки в Н или кгс на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка в мм<sup>2</sup>.



Рисунок 2.5 - Микротвердомер ПМТ-3

Таблица 2.6 – Основные технические характеристики микротвердомера ПМТ-3

Диапазон нагрузки, Н	От 0,0196 до 4,9
Диапазон нагрузки, КГС	От 0,002 до 0,500
Увеличение микроскопа микротвердомера	x130
	x500
	x800
Габаритные размеры, мм (не более)	270x290x470
Масса, кг (не более)	22

А также определяли твердость на ультрамикротвердомере Shimadzu DUH-211S при нагрузке 5мН.



Рисунок 2.6 - Ультрамикротвердомер Shimadzu DUH-211S

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1 Структура и свойства силумина эвтектического состава в исходном состоянии

Силумин эвтектического состава, являющийся материалом исследования настоящей работы, содержит медь, магний, железо, никель и некоторые другие легирующие и примесные элементы. Наличие легирующих и примесных элементов способствует, с одной стороны, повышению прочностных свойств материала, а с другой стороны, приводит к снижению трещиностойкости силумина, что обусловлено формированием интерметаллидов пластинчатой морфологии [31-32]. Характерные изображения структуры травленого шлифа исследуемого силумина, полученные методами сканирующей электронной микроскопии и демонстрирующие многофазный, морфологически разнообразный характер материала, представлены на рис. 3.1.

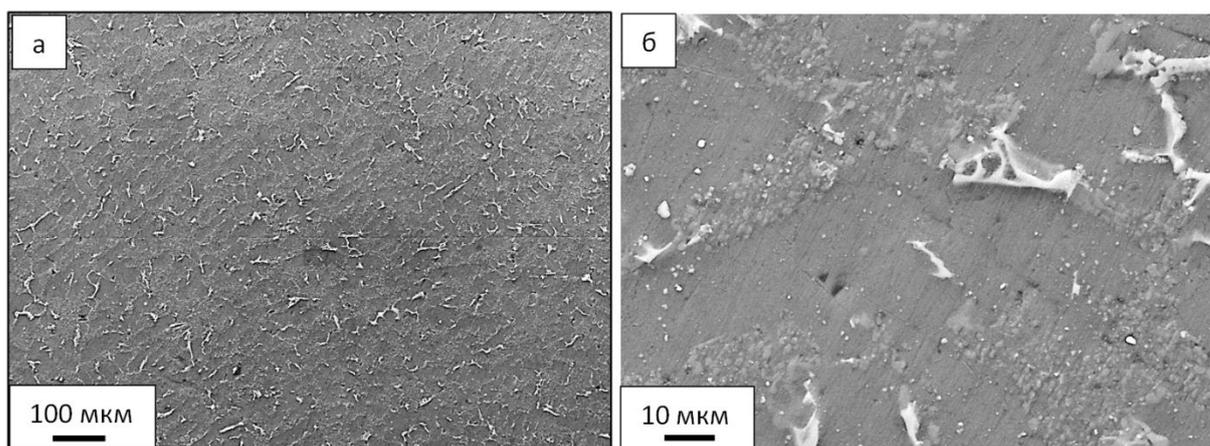


Рисунок 3.1 - Структура силумина марки АК12, выявленная методами сканирующей электронной микроскопии травленого шлифа.

Отчетливо видно, особенно при сравнительно больших увеличениях (рис. 3.1, б), что выделения вторых фаз имеют разнообразную форму. Согласно металлографическим исследованиям, представленным в [31-34], в

силуминах методами избирательного травления можно выявить пластинчатые включения светло-серого цвета – фаза  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{SiFe}$ ); включения, имеющие форму правильных многогранников коричневого цвета – фаза  $\alpha$  ( $\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$ ); при малом количестве железа форма частиц подобна китайским иероглифам; включения серого цвета овальной формы – частицы кремния.

Методы микрорентгеноспектрального анализа позволяют провести исследования элементного состава локально конкретно выбранного включения. На рис. 3.2 и в табл. 3.1 представлены результаты такого анализа силумина. Отчетливо видно, что легирующие элементы сплава распределены в материале весьма неоднородно, формируя соединения, различающиеся размерами, уровнем контраста, морфологией и элементным составом.

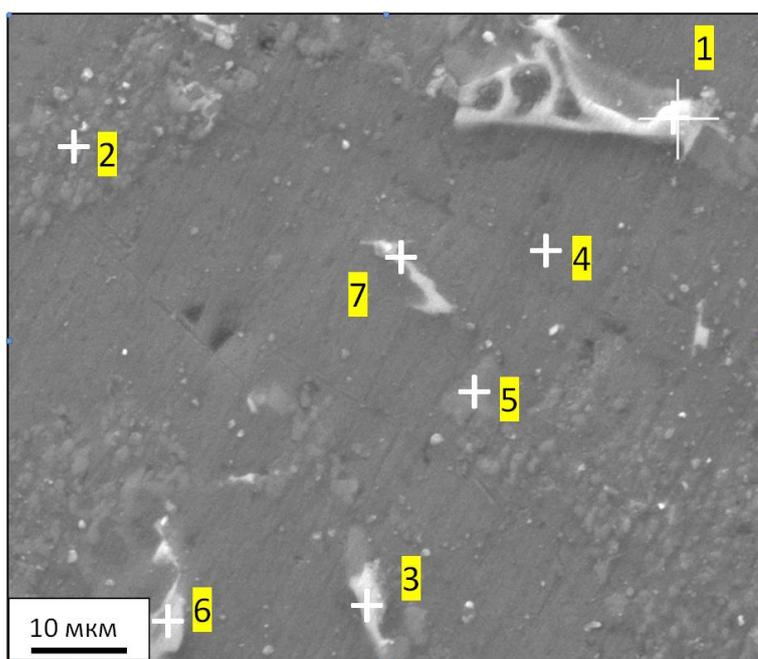


Рисунок 3.2 - Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина эвтектического состава; указаны области, в которых был выполнен микрорентгеноспектральный анализ элементного состава материала.

#### Сканирующая электронная микроскопия.

Фазовый состав силумина определяли методами рентгеноструктурного анализа. Участок рентгенограммы, полученной с исследуемого материала, представлен на рис. 3.3. Результаты количественного анализа

рентгенограммы приведены в таблице 3.2. Анализируя результаты, представленные в табл. 3.2, можно отметить, что основными фазами исследуемого материала, как и следовало ожидать, являются твердые растворы на основе алюминия и кремния.

Таблица 3.1 - Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка поверхности эвтектического силумина, электронно-микроскопическое изображение которого представлено на рис. 3.2.

Область	Элемент (остальное Al, вес. %)				
	Si	Ni	Cu	Fe	Mn
1	0,6	13,5	13,3	0,0	0,0
2	8,7	0,3	2,2	0,0	0,0
3	1,7	11,8	14,0	0,0	0,0
4	0,5	0,2	1,3	0,0	0,0
5	22,5	1,1	1,6	1,2	0,0
6	1,1	14,8	15,8	0,5	0,0
7	2,3	17,2	5,2	2,7	0,6

Таблица 3.2 - Результаты рентгеноструктурного анализа образца эвтектического силумина в литом состоянии

Фаза	Содержание, отн. %	Тип решетки	Параметр решетки, нм		Атомный радиус, нм
			$a_0$	$a$	
Al	84,2	Fm3m	0,4050	0,40484	0,143
Si	12,3	Fm3ms	0,54307	0,54265	0,132

Примечание:  $a_0$  – табличное значение;  $a$  – значение в сплаве.

Параметры кристаллических решеток алюминия и кремния в исследуемом сплаве близки к параметрам кристаллических решеток чистых элементов, что указывает на расслоение данных элементов при кристаллизации сплава. Рентгенофазовый анализ позволил также выявить алюминид меди состава  $AlCu_3$  ( $\approx 3,5$  отн. %), дифракционные максимумы которого указаны на рис. 3 стрелками.

Морфологию и элементный состав силумина в исходном состоянии анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, используя приставку для энергодисперсионного

микрорентгеноспектрального анализа (метод STEM). Результаты выполненных исследований приведены на рис. 3.4 и рис. 3.5.

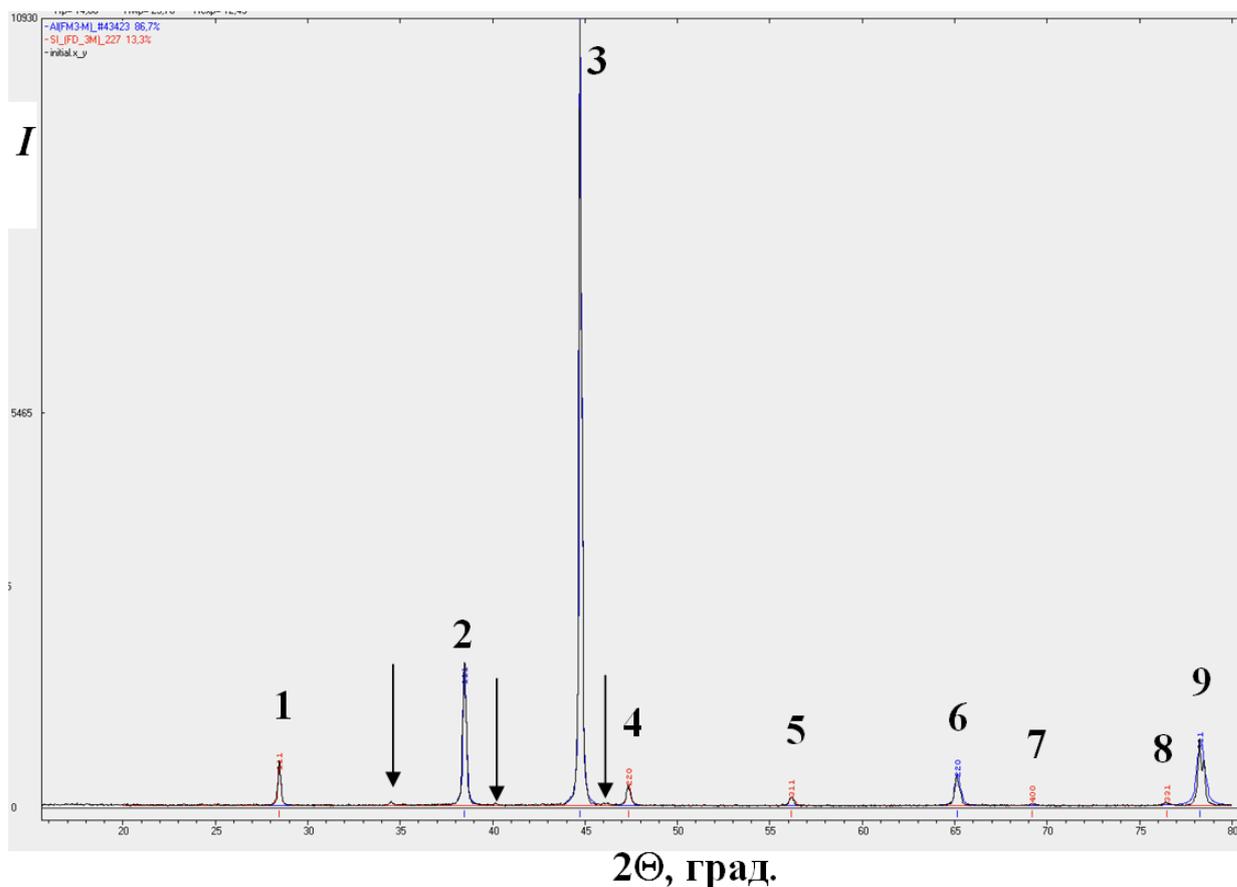


Рисунок 3.3 - Участок рентгенограммы силумина эвтектического состава; цифрами обозначены дифракционные максимумы алюминия и кремния: 1 – (111)Si; 2 – (111)Al; 3 – (200)Al; 4 – (220)Si; 5 – (311)Si; 6 – (220)Al; 7 – (400)Si; 8 – (331)Si; 9 – (311)Al. Стрелками указаны дифракционные максимумы фазы  $AlCu_3$ .

На рис. 3.4 приведены результаты исследования распределения атомов кремния и магния в эвтектическом силумине, выявленные методами STEM. Элементный состав области фольги, приведенной на рис. 3.4, выглядит следующим образом (ат. %): 74.2 % Al, 23.6 % Si, 1.4 % O, 0.6 % Mg, 0.2 % Fe.

На рис. 3.5 приведены другие варианты распределения атомов легирующих элементов, содержащихся в исследуемом силумине, выявленные методами микрорентгеноспектрального анализа (метод STEM).

Элементный состав участков фольги, приведенных на рис. 3.5, представлен в табл. 3.3.

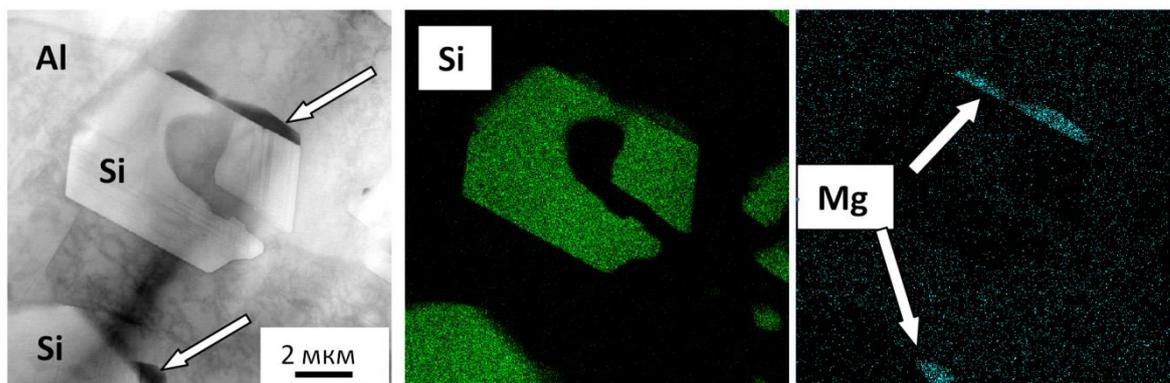


Рисунок 3.4 - Микрорентгеноспектральный анализ элементного состава силумина эвтектического состава (метод STEM).

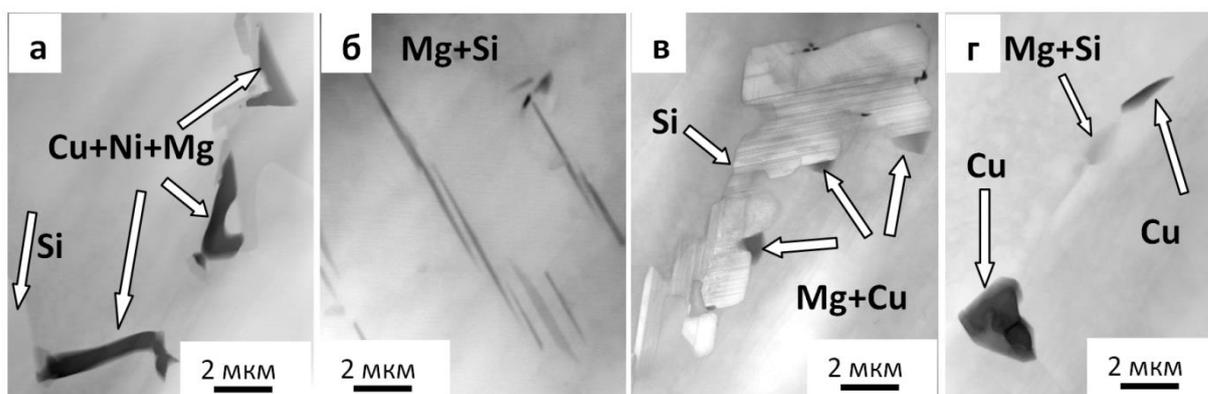


Рисунок 3.5 - Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина марки АК12, полученные в режиме STEM анализа при исследовании элементного состава материала.

Таблица 3.3 - Результаты микрорентгеноспектрального STEM анализа характерных участков фольги эвтектического силумина, электронно-микроскопическое изображение которых представлено на рис. 3.5.

Область	Элемент (остальное Al, ат. %)					
	Si	Ni	Cu	Fe	Mg	O
Рис. 5, а	9,2	1,2	1,8	0,3	2,0	0,0
Рис. 5, б	0,4	0,0	0,0	0,1	1,0	1,2
Рис. 5, в	15,9	0,0	0,8	0,0	0,6	0,8
Рис. 5, г	1,0	0,0	1,5	0,1	0,5	1,6

Следуя результатам, полученным методами СЭМ и STEM, можно констатировать, что присутствующие в литом силумине эвтектического состава легирующие элементы распределены неоднородно, формируя включения, имеющие разнообразный состав, форму и размеры.

Таким образом, полученные при исследовании литого силумина эвтектического состава результаты, выявленные методами рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, показали, что материал является многофазным и содержит, кроме фаз на основе твердых растворов алюминия и кремния, интерметаллидные соединения различного состава. Частицы кремния и интерметаллидов имеют разнообразную форму (глобулярную, пластинчатую, игольчатую или скелетообразную) и, следовательно, могут не только упрочнять материал, но и являться источниками микротрещин при эксплуатации изделий.

### **3.2 Структура и свойства силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию**

В разделе 2 отмечалось, что модифицирование поверхностного слоя силумина осуществляли электровзрывным методом. В качестве легирующего материала были использованы порошки оксида иттрия состава  $Y_2O_3$ . На рис. 3.6 приведены результаты анализа поверхности электровзрывного легирования силумина. Отчетливо видно, что в результате обработки силумина капельно-плазменным потоком формируется поверхностный слой, характеризующийся высоким уровнем шероховатости, содержащий в большом количестве микропоры, микрократеры и микротрещины. Отметим, что формирование подобной структуры характерно для метода электровзрывного легирования и является одним из очевидных его недостатков [35].

Методами микрорентгеноспектрального анализа были проведены исследования элементного состава поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию. Результаты выполненных исследований представлены на рис. 3.7 и табл. 3.4.

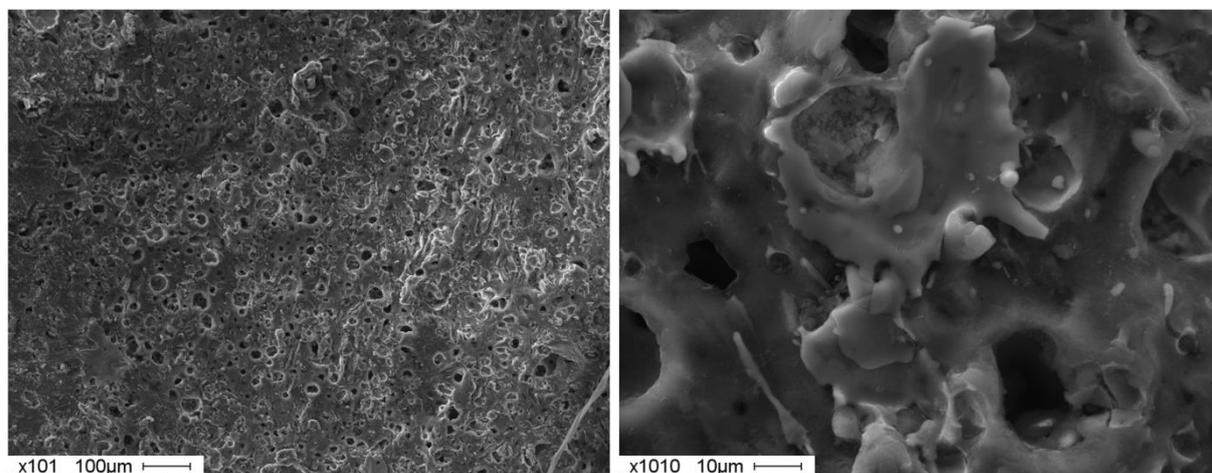


Рисунок 3.6 - Структура поверхности силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию. Сканирующая электронная микроскопия.

Таблица 3.4 - Элементный состав поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию, выявленный методами микрорентгеноспектрального анализа областей, представленных на рис. 3.7. Сканирующая электронная микроскопия. Результаты представлены в вес. %.

Область	Al	Si	Mg	Ti	Fe	Ni	Cu	Y	O	C
Рис. 3.7, а	47,2	3,0	0,6	1,0	0,7	1,3	1,8	16,2	10,8	17,4
Рис. 3.7, в	0,8	0,0	0,0	0,2	0,7	0,5	0,7	34,0	28,1	35,0

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.7 и в таблице 3.4, можно отметить, что электровзрывное легирование приводит к формированию поверхностного слоя с высоким уровнем неоднородности распределения легирующих элементов, что наиболее заметно по распределению атомов иттрия и кислорода. А именно, выявляются области (рис. 3.7, в) в которых концентрация иттрия и кислорода превышает среднюю концентрацию данных элементов в два и более раз. Данные результаты

подтверждают факт присутствия в плазменном потоке частиц порошка легирующего материала, выявленный ранее во многих исследованиях [22].

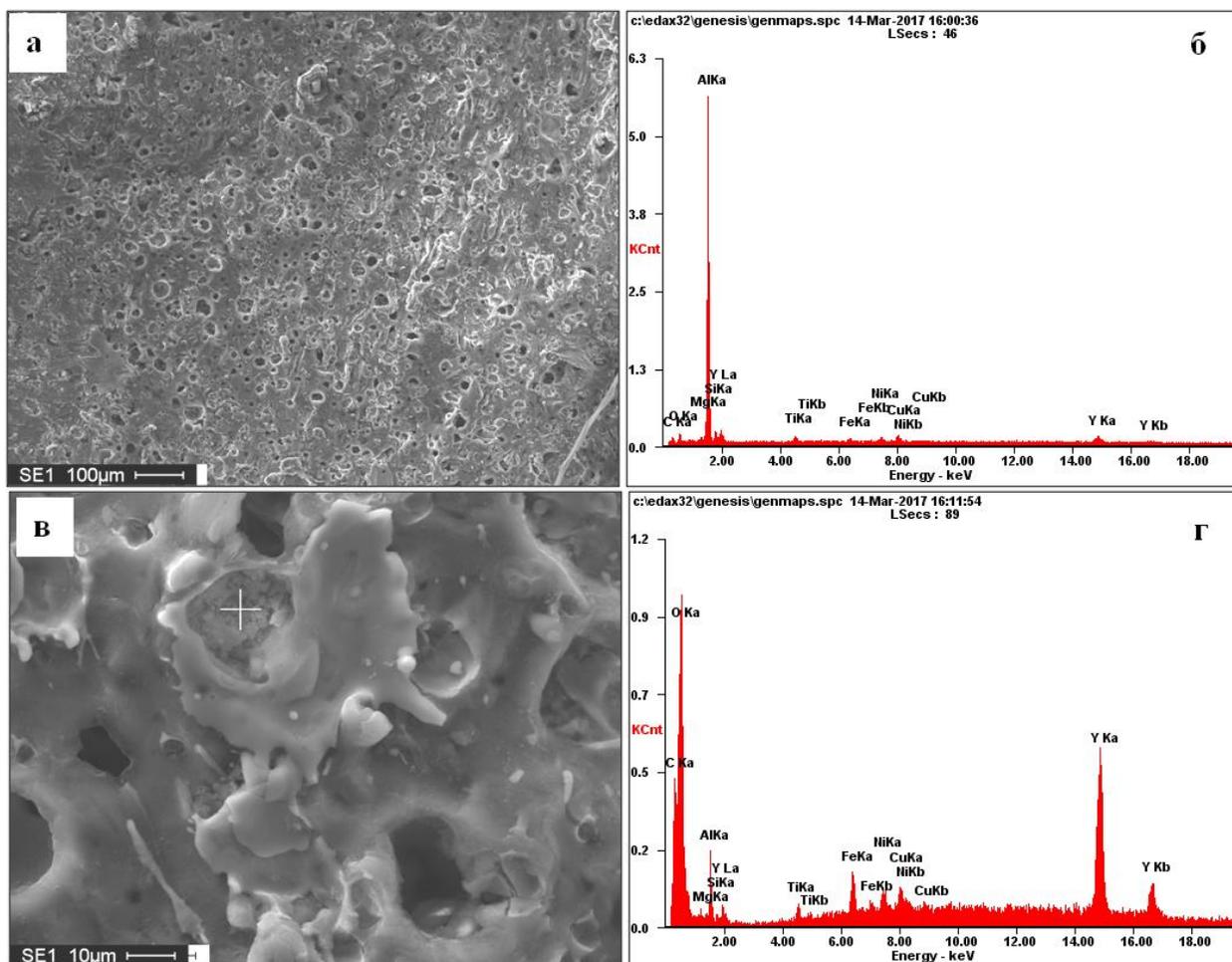


Рисунок 3.7 - Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности силимина, обработанного электровзрывным методом (а, в), и энергетические спектры (б) и (г), полученные с участков (а) и (в, область анализа обозначена значком +), соответственно.

Структуру объема силимина, подвергнутого электровзрывному легирования, анализировали методом поперечных шлифов. Характерное изображение структуры легированного слоя, выявленное методами сканирующей электронной микроскопии, приведено на рис. 3.8. Анализируя представленные на рис. 3.8 результаты, можно отметить, во-первых, что толщина модифицированного слоя изменяется в пределах (30-50) мкм. Во-вторых, высокий уровень пористости. Поры располагаются по всей толщине

модифицированного слоя; размеры пор изменяются от единиц до десятков микрометров.

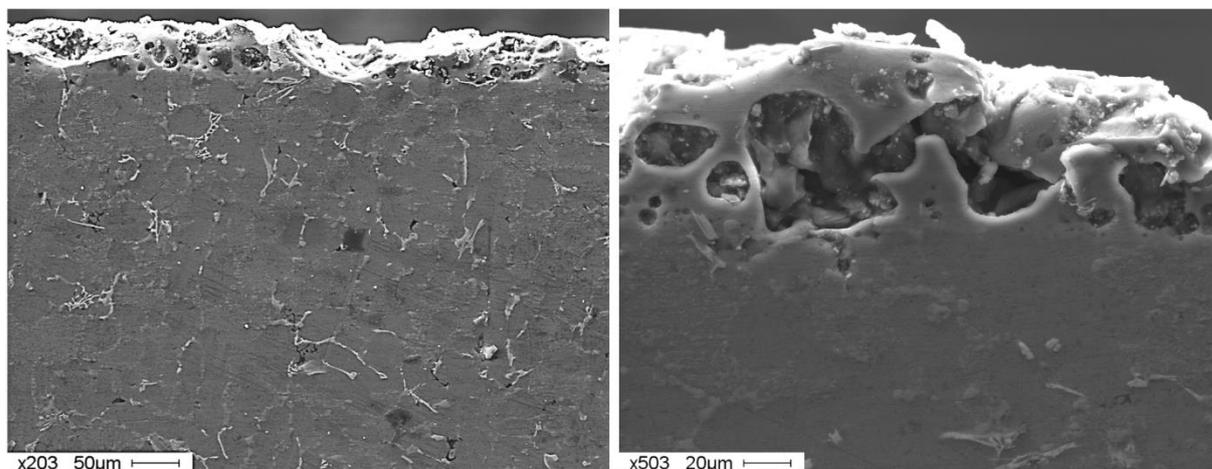


Рисунок 3.8. Структура поперечного шлифа силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию. Сканирующая электронная микроскопия.

Фазовый состав модифицированного электровзрывным методом силумина исследовали методами рентгеноструктурного анализа. На рис. 3.9 приведена рентгенограмма, полученная с изучаемого материала. Количественные результаты фазового анализа материала представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5 - Результаты рентгеноструктурного анализа образца силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию.

Фаза	Содержание, отн. %	Параметр решетки, нм	D(ОКР), нм	$\Delta d/d, 10^{-3}$
Al	68.2	0,40485	75,01	0,24
Si	30.1	0,54231	16,4	0,80
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.7	1.06010	16,6	7,88

Анализируя результаты, представленные в табл. 3.5, можно отметить, во-первых, существенно высокий уровень кремния в поверхностном слое силумина, что может указывать на испарения некоторого слоя алюминия при

электровзрывном легировании. Во-вторых, присутствие фазы  $Y_2O_3$ , что может быть обусловлено внедрением частиц исходного порошка оксида иттрия в поверхностный слой силумина при электровзрывном легировании.

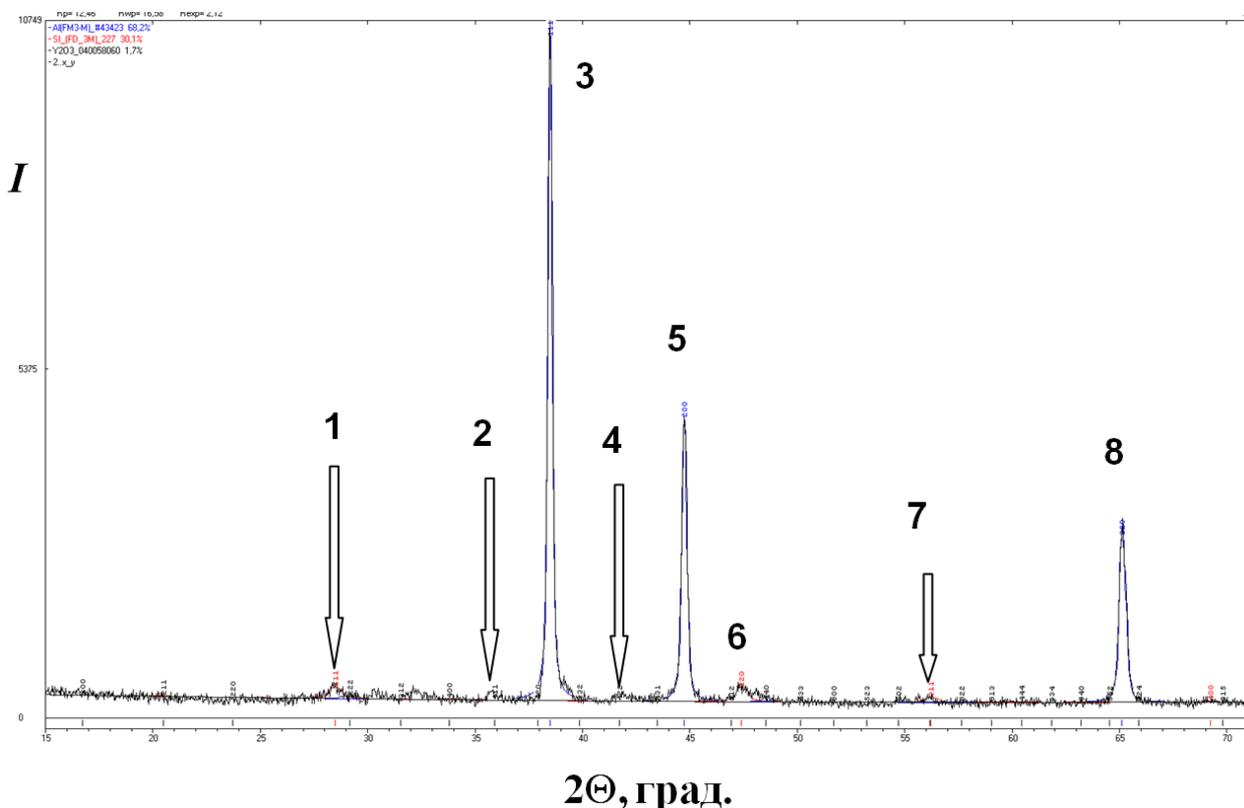


Рисунок 3.9 - Участок рентгенограммы силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию; цифрами обозначены дифракционные максимумы алюминия и кремния и  $Y_2O_3$ : 1 – (111)Si; 2 – (411)  $Y_2O_3$ ; 3 – (111)Al; 4 – (422)  $Y_2O_3$ ; 5 – (200)Al; 6 – (220)Si; 7 – (311)Si; 8 – (220)Al.

Дефектную субструктуру и фазовый состав поверхностного слоя силумина, модифицированного электровзрывным методом, анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Установлено, что в результате высокоскоростного охлаждения модифицированного слоя, имеющего место при электровзрывном легировании, в поверхностном слое формируется структура ячеистой кристаллизации алюминия (рис. 3.10, а). Размер ячеек кристаллизации изменяется в пределах (200-450) нм. По границам ячеек располагаются прослойки второй фазы. Методами микрорентгеноспектрального анализа

установлено, что прослойки сформированы атомами кремния и иттрия (рис. 3.10, б, в).

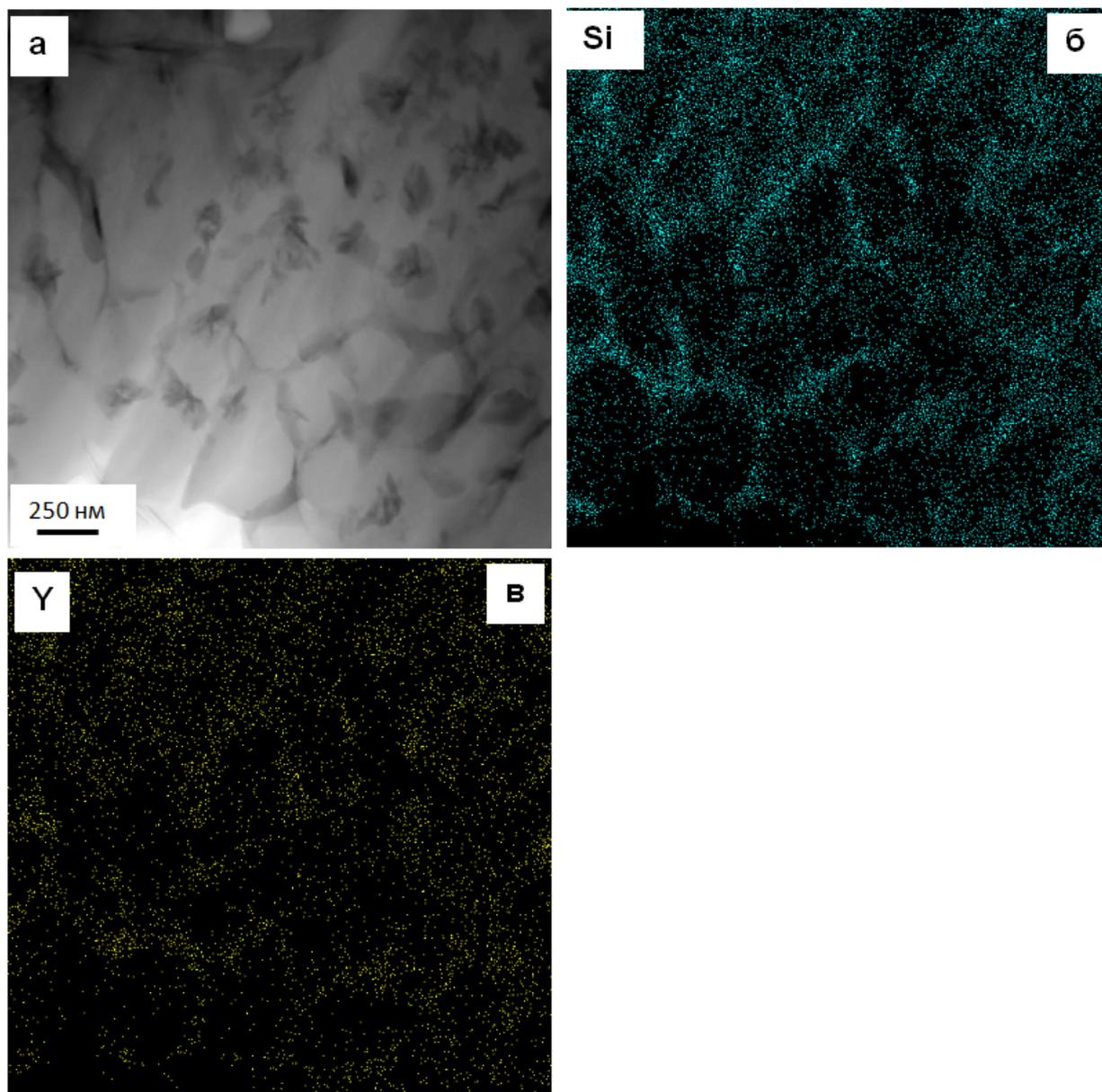


Рисунок 3.10 - Микрорентгеноспектральный анализ элементного состава силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию (метод STEM).

Результаты количественного анализа элементного состава участка образца, представленного на рис. 3.10, а, приведены в табл. 3.6. Обращает на себя внимание низкая концентрация атомов кислорода, что может косвенно

свидетельствовать об отсутствии окисной фазы на границах ячеек кристаллизации.

Таблица 3.6 - Таблица результатов микрорентгеноспектрального анализа элементного состава силумина, подвергнутого электровзрывному легированию (вес. %, Al – остальное). Энергетические спектры получены с участка образца, изображенного на рис. 3.10, а.

Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Ti	Y	O
6.8	1.4	0.0	1.0	0.5	0.0	1.5	0.5

Фазовый анализ поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию, исследовали методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии с привлечением методики темнопольного анализа и индцирования соответствующих микроэлектронограмм. На рис. 3.11 приведены электронно-микроскопические изображения структуры ячеистой кристаллизации силумина. Отчетливо видно, что ячейки имеют овальную форму. Размеры ячеек изменяются в пределах от 150 нм до 350 нм. Микродифракционный анализ показал, что ячейки являются твердым раствором на основе алюминия (рис. 3.11, в). В объеме ячеек методами темнопольного анализа выявляются частицы второй фазы; размеры частиц изменяются в пределах единиц нанометров (рис. 3.11, в).

Ячейки разделены широкими прослойками второй фазы, имеющими наноразмерную структуру (рис. 3.11, г). Микродифракционный анализ выявил присутствие рефлексов следующих фаз: Al; Si;  $YSi_2$  и  $Y_2Si_2O_7$ . Данные результаты хорошо согласуются с результатами микрорентгеноспектрального анализа, приведенными на рис. 3.10 из которых следует, что прослойки, разделяющие ячейки, обогащены атомами кремния и иттрия.

Механические свойства модифицированного слоя силумина исследовали, определяя микротвердость (нагрузка на индентор 0,5 Н). Вследствие высокого уровня шероховатости определить микротвердость поверхности образца не удалось.

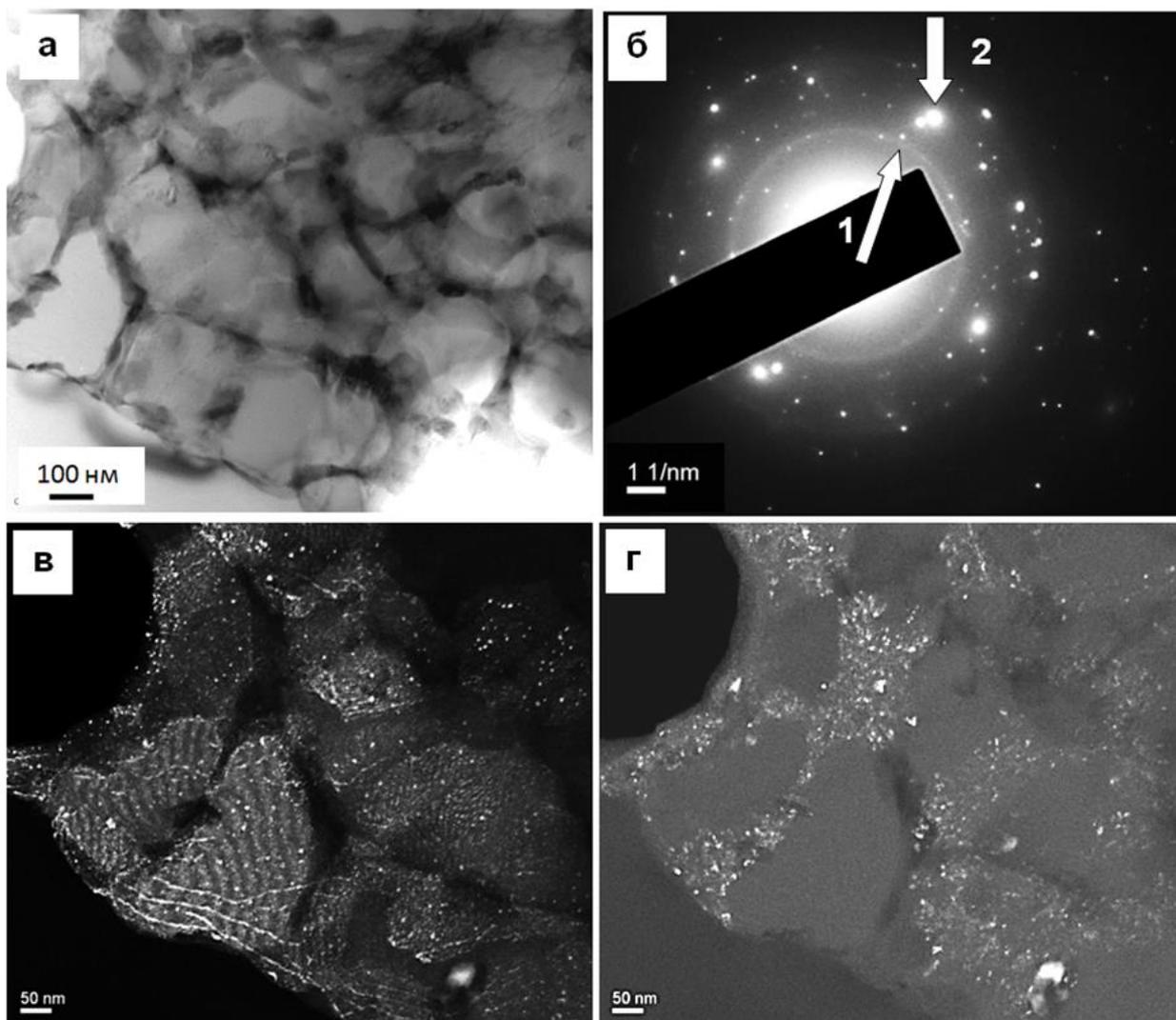


Рисунок 3.11 - Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию; а – светлое поле; б – микроэлектронграмма, стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля; в – темное поле, полученное в рефлексах, обозначенных 2  $[111]Al + [112]YSi_2$ ; г – темное поле, полученное в рефлексе 1  $[111]Si + [111]Y_2Si_2O_7$  (кольцо).

Определение микротвердости осуществляли на поперечных шлифах. Результаты исследования приведены на рис. 3.12. Как и следовало ожидать,

микротвердость материала максимальна у поверхности модифицирования и превышает микротвердость исходного материала более чем в 2 раза. По мере увеличения расстояния от поверхности модифицирования микротвердость снижается и на глубине  $\approx 70$  мкм достигает микротвердости исходного силумина.

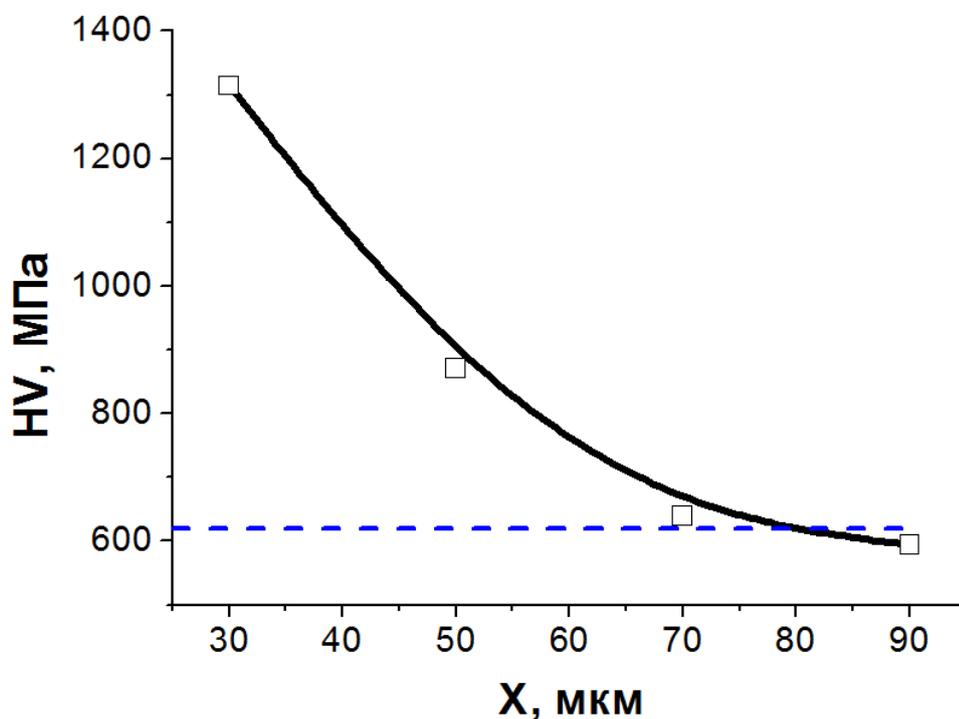


Рисунок 3.12. профиль микротвердости силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию.

Трибологические свойства модифицированного слоя силумина изучали, определяя износостойкость и коэффициент трения (табл. 3.7). На рис. 3.13 приведены дорожки износа, формируемые при испытаниях на износостойкость.

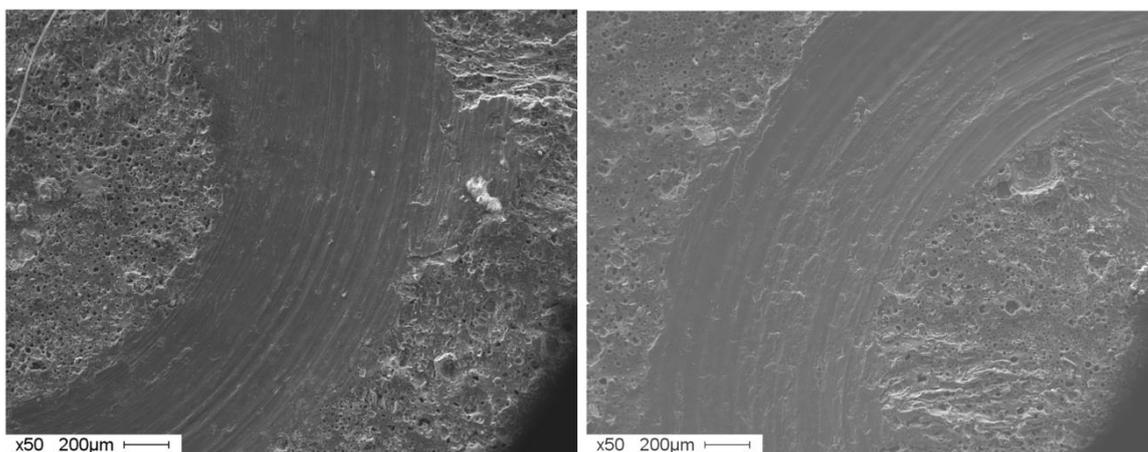


Рисунок 3.13. Дорожки трения, сформировавшиеся при трибологических испытаниях силумина, подвергнутого электровзрывному легированию.

Сканирующая электронная микроскопия.

Таблица 3.7 - Результаты трибологических испытаний силумина эвтектического состава, модифицированного методом электровзрывного легирования

Образец	Коэффициент износа, $10^{-5}$ , мм <sup>3</sup> /Н*м	Коэффициент трения
Исходный	160	0,36
Модифицированный	5,6	0,16

Анализ результатов, представленных в табл. 3.7, показывает, что износостойкость исследуемого материала после электровзрывного легирования увеличилась, по сравнению с износостойкостью исходного силумина, более чем в 28 раз; коэффициент трения снизился более чем в 2 раза. Изменение коэффициента трения в процессе испытаний материала на износостойкость, приведено на рис. 3.14.

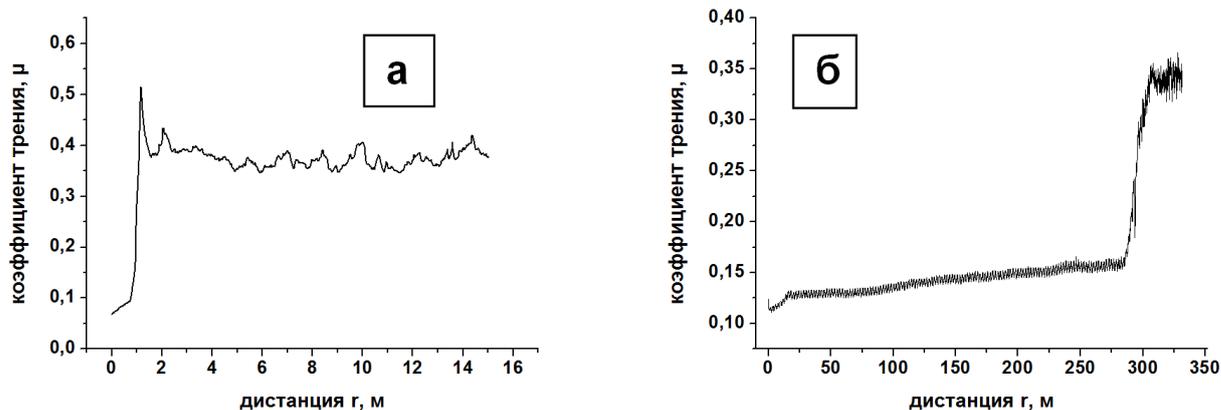


Рисунок 3.14 - Зависимость величины коэффициента трения от расстояния, пройденного контртелом вдоль дорожки трения при испытаниях на износостойкость; а – силумин в литом состоянии; б – силумин после электровзрывного легирования.

Таким образом, результаты, представленные в настоящем разделе, свидетельствуют о том, что электровзрывное легирование силумина эвтектического состава сопровождается формированием высокопористого поверхностного слоя толщиной до 50 мкм, характеризующегося неоднородностью в распределении легирующих элементов (иттрий и кислород), субмикро- и наноразмерной многофазной структурой, высокими (многократно превышающими значения силумина литого состояния) значениями износостойкости и микротвердости.

### **3.3 Структура и свойства силумина эвтектического состава, подвергнутого ЭВЛ и последующему облучению интенсивным импульсным электронным пучком**

С целью устранения высокого уровня шероховатости и пористости поверхностного слоя силумина, модифицированного электровзрывным методом, была произведена дополнительная обработка материала интенсивным импульсным электронным пучком. Режим облучения: энергия ускоренных электронов 17 кэВ; плотность энергии пучка электронов 40 Дж/см<sup>2</sup>; количество импульсов воздействия 10; частота следования

импульсов  $0,3 \text{ с}^{-1}$ ; длительность импульсов воздействия 50 мкс, 150 мкс, 200 мкс. Предварительно выполненные расчеты температурного поля показали, что при данных параметрах пучка электронов в поверхностном слое силумина достигается температура, превышающая температуру плавления всех присутствующих в материале фаз.

Выполненные исследования показали, что обработка модифицированной поверхности силумина интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается кардинальным изменением морфологии структуры поверхностного слоя материала. Исследования, выполненные методами сканирующей электронной микроскопии, показали, что в результате облучения формируется высокоплотный гладкий поверхностный слой, характерное изображение которого приведено на рис. 3.15. Поверхность облучения имеет субмикроструктурную структуру с размером кристаллитов  $\approx 500 \text{ нм}$  (рис. 3.15, б, г, е). Кристаллиты сгруппированы в области размерами (2-4) мкм, разделенные микротрещинами (рис. 3.15, б). По мере увеличения длительности импульса пучка электронов количество микротрещин в поверхностном слое снижается.

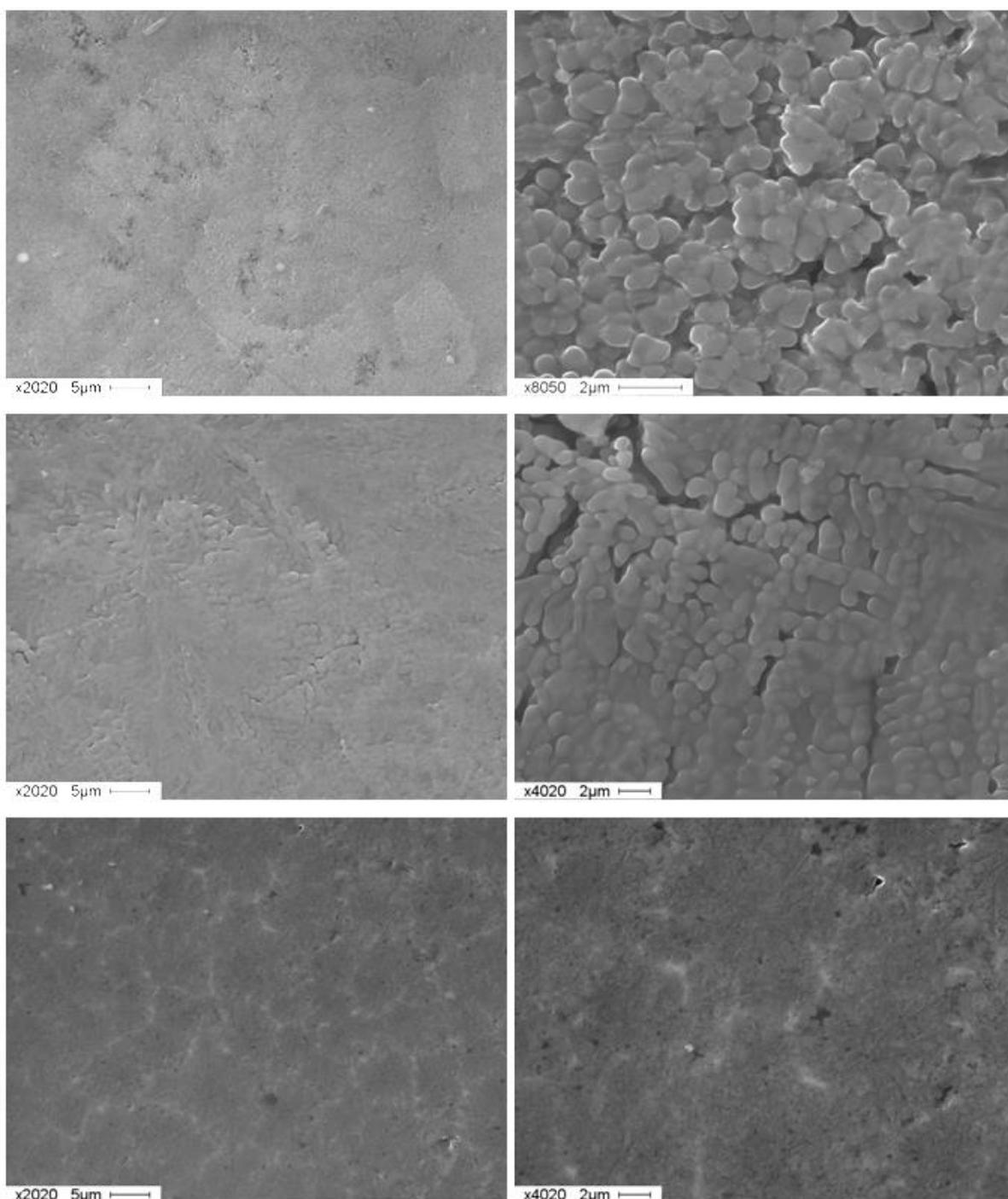


Рисунок 3.15. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности силумина, подвергнутого электровзрывному легированию и последующему облучению интенсивным импульсным электронным пучком с длительностью импульса: а, б – 50 мкс; в, г – 150 мкс; д, е – 200 мкс.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию и последующему облучению электронным пучком, приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 - Таблица результатов микрорентгеноспектрального анализа элементного состава силумина, подвергнутого электровзрывному легированию и последующему облучению электронным пучком (вес. %, Al – остальное). Энергетические спектры получены с участка образца, изображенного на рис. 3.10, а.

Si	Mg	Cu	Ni	Y	O
50 мкс					
5,2	0,9	3,8	1,9	7,7	1,5
150 мкс					
5,3	0,0	2,8	1,4	7,7	3,7
200 мкс					
9,0	0,0	4,7	2,8	9,8	4,1

Сопоставляя результаты, представленные в табл. 3,8 и табл. 3.4, можно отметить, что облучение модифицированного слоя силумина интенсивным импульсным электронным пучком приводит к увеличению в поверхностном слое концентрации кремния и меди и существенному снижению концентрации иттрия и кислорода.

Результаты исследования фазового состава поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию и последующему облучению интенсивным импульсным электронным пучком, осуществляли методами рентгенофазового анализа. Результаты анализа приведены в табл. 3.9.

Анализируя представленные в таблице результаты, можно отметить, что с увеличением длительности импульса пучка электронов изменяется фазовый состав поверхностного слоя материала, а именно, снижается относительное содержание оксида иттрия и кремния. Снижение содержания оксида иттрия может быть связано с его растворением в расплаве силумина. Относительно высокое содержание кремния в поверхностном слое силумина,

облученного электронным пучком с длительностью импульса 50 мкс, может быть обусловлено испарением алюминия.

Структуру объема силумина, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей обработке интенсивным импульсным электронным пучком, анализировали методом поперечных шлифов. Характерное изображение структуры легированного слоя, выявленное методами сканирующей электронной микроскопии, приведено на рис. 3.16.

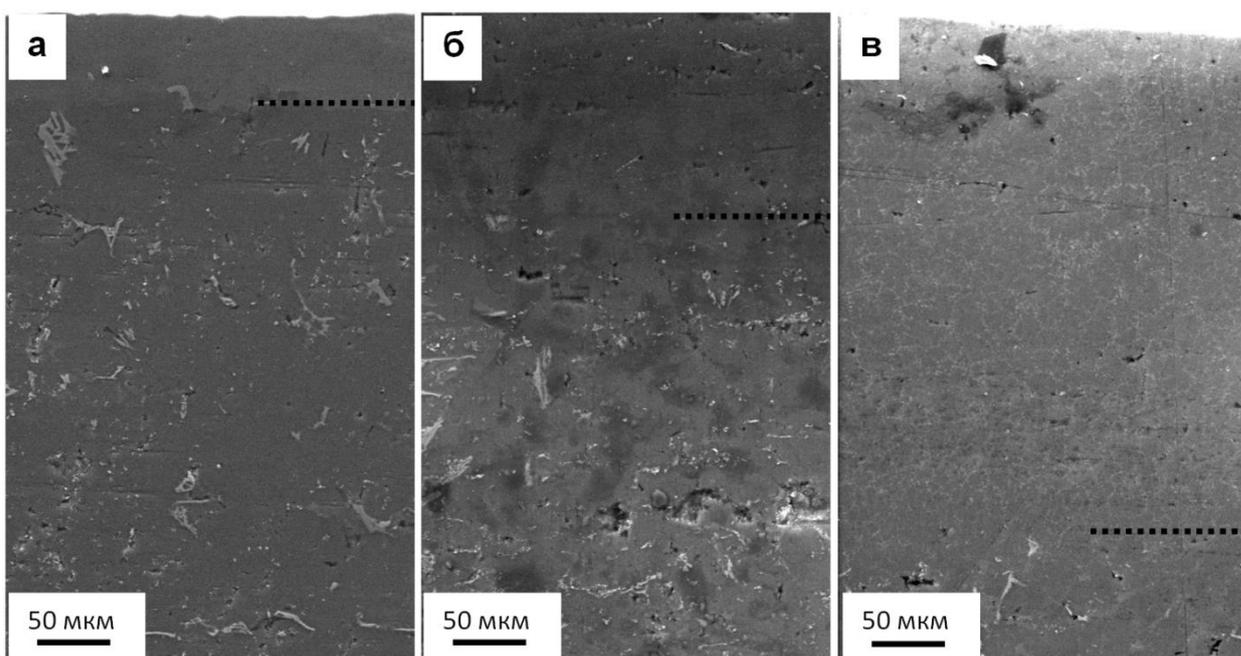


Рисунок 3.16 - Структура поперечного шлифа силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей обработке интенсивным импульсным электронным пучком с длительностью импульса пучка: а – 50 мкс; б – 150 мкс; в – 200 мкс. Сканирующая электронная микроскопия.

Анализируя представленные на данном рисунке результаты, можно отметить, во-первых, что толщина модифицированного слоя зависит от длительности импульса пучка электронов и увеличивается от 60 мкм при длительности импульса 50 мкс, до 340 мкм при длительности импульса 200 мкс. Отметим, что толщина модифицированного слоя при электровзрывном легировании изменялась в пределах (30-50) мкм (рис. 3.8). Во-вторых, высокий уровень плотности модифицированного слоя; минимальное

количество пор выявляется при облучении материала электронным пучком с длительностью импульса 50 мкс.

Механические свойства модифицированного слоя силумина характеризовали величиной микротвердости (нагрузка на индентор 0,5 Н). Результаты выполненных исследований приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9 - Результаты механических и трибологических испытаний силумина эвтектического состава, модифицированного методом электровзрывного легирования и дополнительно облученного интенсивным импульсным электронным пучком

№	AlSi+ЭВЛ (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + НСЭП	HV*, кг/мм <sup>2</sup> , 0,5 Н	HV**, кг/мм <sup>2</sup> , 0,2 Н	Коэффициент трения, μ	Коэффициент износа, 10 <sup>-4</sup> , мм <sup>3</sup> /Н*м,
	исходный AlSi	70		0,36	16,0
	AlSi+ЭВЛ (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )			0,16	0,56
1	40 Дж/см <sup>2</sup> , 50 мкс, 10 имп.	130	170	0,43	4,2
2	40 Дж/см <sup>2</sup> , 150 мкс, 10 имп.	140	150	0,47	3,1
3	40 Дж/см <sup>2</sup> , 200 мкс, 10 имп.	103	115	0,49	1,1

Примечание: HV\* - нагрузка на индентор 0,5 Н; HV\*\* - нагрузка на индентор 0,2 Н

Анализируя результаты, представленные в табл. 3.9, можно отметить, что микротвердость модифицированного поверхностного слоя почти в 2 раза превышает микротвердость литого силумина. С увеличением длительности импульса пучка электронов микротвердость поверхностного модифицированного слоя снижается.

Определение микротвердости модифицированного объемного слоя осуществляли на поперечных шлифах. Результаты исследования приведены на рис. 3.17. Анализируя представленные на рис. 3.17 результаты, можно выявить следующие закономерности. Во-первых, микротвердость силумина в объеме модифицированного слоя изменяется незначительно. Во-вторых, с

увеличением длительности импульса пучка электронов величина микротвердость модифицированного слоя снижается. В-третьих, толщина поверхностного слоя с высоким значением микротвердости соответствует (не зависимо от режима облучения материала импульсным электронным пучком) толщине слоя, выявленного методами сканирующей электронной микроскопии при исследовании структуры поперечных шлифов.

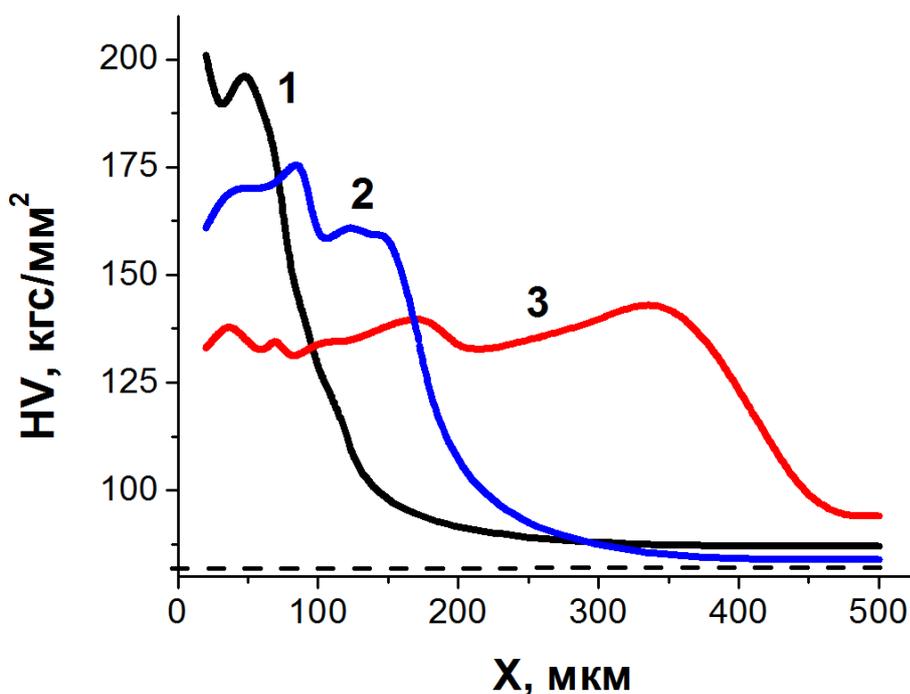


Рисунок 3.17 - Профиль микротвердости поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей обработке интенсивным импульсным электронным пучком с параметрами: кривая 1 – 40 Дж/см<sup>2</sup>; 50 мкс; 10 имп.; кривая 2 – 40 Дж/см<sup>2</sup>; 150 мкс; 10 имп.; кривая 3 – 40 Дж/см<sup>2</sup>; 200 мкс; 10 имп.

Результаты трибологических испытаний силумина эвтектического состава, подвергнутого электровзрывному легированию и последующему облучению интенсивным импульсным электронным пучком, приведены в табл. 3.9. Отчетливо видно, что обработка модифицированного слоя электронным пучком приводит к снижению износостойкости материала в 2 – 7,5 раз. Увеличение длительности импульса пучка электронов сопровождается ростом износостойкости материала, в лучшем случае (при

длительности импульсов пучка электронов 200 мкс), превышающей износостойкость литого силумина в  $\approx 16$  раз.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕДИНЕНИЕ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа 4БМ5Б	ФИО Морозова Надежда Николаевна
-----------------	------------------------------------

Институт	ИФВТ	Кафедра	Наноматериалов и нанотехнологий
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость затрат научного исследования (НИ)	Положение об оплате труда в Томском политехническом университете.
2. Продолжительность выполнения НИ	Приблизительная оценка продолжительности выполнения НИ составляет 120 рабочих дня.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка потенциала и перспективности реализации НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	SWOT-анализ позволит провести оценку потенциала и перспективности реализации научно-исследовательского проекта.
2. Планирование и формирование графика работ по реализации НИ	Для составления графика научно-исследовательской работы используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным строится график, позволяющий лучше спланировать процесс реализации научного исследования.
3. Формирование сметы	В процессе формирования сметы НИ используется следующая группировка затрат по статьям: <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ материальные расходы</li> <li>✓ электроэнергия</li> <li>✓ полная заработная плата исполнителей;</li> <li>✓ отчисления во внебюджетные фонды;</li> <li>✓ накладные расходы</li> </ul>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Матрица SWOT
2. Интерактивная матрица возможностей
3. Интерактивная матрица угроз
4. Временные показатели проведения НИ
5. Диаграмма Ганта

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента	Черепанова Н.В.	к.ф.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Морозова Надежда Николаевна		

## **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Привлекательность научного исследования определяется с одной стороны превышением технических параметров над уже разработанными технологическими решениями и с другой стороны экономической выгодой проекта: востребованностью, ценой продукта, сроком выхода на рынок и др.

### **4.1 SWOT-анализ исследований методом идентификации**

SWOT-анализ — метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) [36].

Целью данного анализа является определение сильных и слабых сторон научного исследования, а также его потенциальных возможностей и угроз. Данное исследование включает в себя изучение структуры и свойств силумина эвтектического состава, полученных комбинированным методом, сочетающим электровзрывное легирование порошками оксида иттрия и

последующее облучение легированного слоя интенсивным импульсным электронным пучком. Матрица SWOT приведена в таблице 4.1. В таблице применяется следующая система сокращений.

Матрица SWOT приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Матрица SWOT исследования методом индентирования

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>S1. Простое в сборке и обслуживании оборудование.</p> <p>S2. Квалифицированная проектная команда.</p> <p>S3. Наличие оборудования и материалов для исследования</p> <p>S4. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>S5. Наличие квалифицированного персонала у потенциальных потребителей</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>W1. Работа с мелкодисперсными порошками требует наличие вентиляционной системы.</p> <p>W2. Необходимость применения СИЗ в процессе работы.</p> <p>W3. Закупка иностранного сырья и оборудования.</p> <p>W4. Длительный срок поставки сырья.</p>
<p>Возможности:</p> <p>O1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>O2. Использование массового производства.</p> <p>O3. Появление дополнительного спроса на технологию.</p>	<p>O2S1S2S3S4S5; O3S1.</p>	<p>O2W3W4; O3W1W2W3W4.</p>

Продолжение таблицы 4.1

<p>Угрозы:  Т1. Отсутствие спроса на технологии производства  Т2. Ограничения на экспорт технологии.  Т3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции.  Т4. Возможный рост стоимости сырья  Т5. Отсутствие финансового обеспечения со стороны государства</p>	<p>T1 S3S4S5;  T3S1S2S3;  T4S4;  T5S2S4.</p>	<p>T1W1W2W3W4;  T2W3W4;  T3W1W2W3;  T4W3W4;  T5W1W2W3.</p>
<p>Примечание: S – сильные стороны, W – слабые стороны, O – возможности, T – угрозы</p>		

Построение возможностей и угроз на основе SWOT-матрицы, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации Таблица 4.2 – Интерактивная матрица возможностей

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица возможностей

<p>Возможности (O)</p>	Сильные стороны проекта					
		S1	S2	S3	S4	S5
	O1	-	-	-	-	-
	O2	+	+	+	+	-
	O3	+	-	-	-	-
	Слабые стороны проекта					
		W1	W2	W3	W4	
	O1	-	-	-	-	-
	O2	-	-	+	+	+
	O3	+	+	+	+	+
<p>Примечание: «+» - слабое соответствие, «-» - сильное соответствие</p>						

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы (Т)	Сильные стороны проекта					
		S1	S2	S3	S4	S5
	T1	-	-	+	+	+
	T2	-	-	-	-	-
	T3	+	+	+	-	-
	T4	-	-	-	+	-
	T5	-	+	-	+	-
	Слабые стороны проекта					
		W1	W2	W3	W4	
	T1	+	+	+	+	
	T2	-	-	+	+	
	T3	+	+	+	-	
	T4	-	-	+	+	
	T5	+	+	+	-	
	Примечание: «+» - слабое соответствие, «-» - сильное соответствие					

На основе SWOT-анализа можно сделать выводы, о том что данное научное исследование обладает весомыми сильными сторонами, такими как наличие бюджетного финансирования, наличие коллектива с высоким научным потенциалом. К недостаткам же можно отнести дефицит оборудования, т.к. установка «СОЛО» имеется в единственном экземпляре в России, а в мире их всего две. Поэтому массовое использование данного оборудования затрудняется. Главной возможностью метода, применяемого в научном исследовании, является появление дополнительного спроса, поскольку предполагается улучшение свойств изделий и уменьшение затрат на легирующий элемент. Также возможны значительные угрозы в виде отсутствия финансирования, роста стоимости сырья, а также его времени доставки.

## 4.2 Планирование НИР

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований

### 4.2.1 Структура работ

Для выполнения научных исследований формируется группа, в состав которой входит преподаватель и дипломник.

Таблица 4.4 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Составление ТЗ	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Изучение литературы	Дипломник
	3	Составление схемы проекта	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Выбор оборудования	Дипломник, руководитель
	5	Проверка оборудования	Руководитель, дипломник
Выполнение задания	6	Выполнение работы	Дипломник
	7	Составление пояснительно записки	Дипломник
Обобщение и оценка результатов	8	Проверка задания	Дипломник, руководитель
	9	Сдача проекта	Дипломник, руководитель

## 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества факторов. Методика оценки приведена в [36].

Для определения ожидаемого значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, ч-д;  $t_{\text{min}i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (наиболее благоприятные обстоятельства), ч-д;  $t_{\text{max}i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (наиболее неблагоприятные обстоятельства), ч-д.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{p_i} = \frac{t_{\text{ож}i}}{ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{p_i}$  – продолжительность одной работы, раб. д;  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, ч-д;  $ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

## 4.2.3 Разработка графика выполнения научного исследования

В качестве графика можно использовать диаграмму Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для построения графика длительность каждого из этапов работ устанавливается в рабочих днях

Данные для построения графика представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения научного исследования

Номер этапа	Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $T_{pi}$
		$t_{min}$ , чел.-дни	$t_{max}$ , чел.-дни	$t_{ож}$ , чел.-дни		
1	Составление ТЗ	1	2	1,4	1	1
2	Изучение литературы	17	23	19,4	1	20
3	Составление схемы проекта	1	2	1,4	1	1
4	Выбор материала	7	10	8,2	2	6
5	Получение сплава	5	8	6,2	2	4
6	Изучение структуры и свойств	53	73	61	1	61
7	Составление пояснительной записки	16	20	18	1	18
8	Проверка проекта	5	8	6,2	2	6
9	Сдача проекта	3	5	3,8	2	2
Итого						120

По результатам расчетов строится диаграмма Ганта, приведенная в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Диаграмма Ганта

Номер этапа	Этап работы	Исполнители	Т <sub>к<sub>п</sub></sub> , раб. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				Фев.			Март			Апр.			Май			Июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление ТЗ	Р	1	-														
2	Изучение литературы	Д	20	█	█	█												
3	Составление схемы проекта	Р	1			-												
4	Выбор материала	Д	6			█												
		Р	2			-												
5	Получение сплава	А	4			█												
		Р	2			-												
6	Изучение структуры и свойств	Д	61				█	█	█	█	█	█	█	█				
7	Составление пояснительной записки	Д	18										█	█	█			
8	Проверка проекта	Д	6													█		
		Р	1													-		
9	Сдача проекта	Д	2														█	
		Р	2														-	
Примечание: Д – дипломник, Р – руководитель, А – аспирант																		

На основе анализа составленной диаграммы Ганта можно сделать вывод, что продолжительность работ составляет 12 декад, начиная со второй декады января и заканчивая первой декадой мая. Также следует учитывать вероятностный характер оценки трудоемкости, что значит возможность как сокращения, так и увеличения продолжительности работ.

Далее по диаграмме Ганта можно рассчитать время работы для каждого исполнителя.

Продолжительность выполнения исследования составит 120 рабочих дней. Из них:

114 дней – продолжительность выполнения работ дипломником;

9 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

4 дня – продолжительность выполнения работ аспирантом .

### **4.3 Составление сметы научного исследования**

При планировании сметы научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением [37]. В процессе формирования сметы НИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- полная заработная плата;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы;

#### **4.3.1 Полная заработная плата исполнителей темы**

Величина расходов на заработную плату определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок [37]

Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.6)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-15 % от  $Z_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) исполнителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. д. (таблица 4.6);  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{тс}} + Z_{\text{рк}}}{F_d}, \quad (4.8)$$

где  $F_d$  – количество рабочих дней в месяце (26 при шести дневной рабочей неделе, 22 при пяти дневной рабочей неделе), раб. д.;  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $Z_{\text{рк}}$  – районная доплата (30%), руб. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$ , руб.	$Z_{\text{рк}}$ , руб.	$Z_{\text{м}}$ , руб.	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	23000	7560	32760	1260	9	9140
Дипломник	8000	2400	3510	400	114	45600
Аспирант	8000	2400	3510	400	4	1600
Итого $Z_{\text{осн}}$ , руб.						56340

Расчет дополнительной заработной платы, размер которой составляет 12 – 15% (14%) от основной, представлен в таблице 4.8

Таблица 4.8 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн}}$ , руб.	$Z_{\text{доп}}$ , руб.	$Z_{\text{зп}}$ , руб.
Руководитель	0,15	9140	1371	10511
Дипломник	0,12	45600	5472	51072
Аспирант	0,12	1600	192	1792
Итого $Z_{\text{осн}}$ , руб.		56340	7035	63375

### 4.3.2 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данном пункте отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (4.9)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

В 2017 установлен размер страховых взносов – 27,1%. Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot (63375) = 17,174 \text{ тыс. руб.}$$

### 4.3.3 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр}, \quad (4.10)$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Таким образом, величина равняется 6400 рублей

### 4.3.4 Формирование сметы затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования сметы затрат, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в

качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение затрат на научно-исследовательский проект приведено в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Смета научного исследования

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	63,375	72,9
2. Отчисления во внебюджетные фонды	17,174	19,8
3. Накладные расходы	6,4	7,3
4. Бюджет затрат НИ	86,949	100,0

Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию научно-исследовательского проекта составят 46,6 тысяч рублей, из которых более 80% связаны с оплатой труда и отчислениями во внебюджетные фонды.

#### 4.4 Оценка ресурсоэффективности НИР

*Интегральный показатель ресурсоэффективности* вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (16)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Оценку характеристик проведем на основе критериев, соответствующих требованиям к НИР:

№1 Производительность: исследование проводится в пределах одной лаборатории, оборудованной всем необходимым;

№2 Материалоемкость: бесперебойное снабжение объектами исследований;

№3 Удобство эксплуатации оборудования: возможность использования персоналом доступного, автоматизированного оборудования;

№4 Энергосбережение: использование малого количества энергии для выполнения НИР;

№5 Надежность: выполнение НИР с исключением ситуаций, опасных для людей или окружающей среды;

Оценка характеристик выполнения НИР для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности представлена в таблице (табл. 4.12).

Таблица 4.10 - Сравнительная оценка характеристик вариантов выполнения НИР

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Балльная оценка
1. Производительность	0,1	4
2. Материалоемкость	0,1	4
2. Удобство эксплуатации оборудования	0,3	5
3. Энергосбережение	0,25	5
4. Надежность	0,25	4
ИТОГО	1	

Расчет интегрального показателя эффективности НИР:

$$I_p = 4*0,1+4*0,1+0,3*5+0,25*5+0,25*4 = 4,55$$

Из оценки интегрального показателя ресурсоэффективности выполнения НИР можно сделать вывод о том, что данное научное исследования соответствует высокому уровню ресурсоэффективности.

#### Заключение

1. SWOT анализ научного исследования выявил сильные и слабые стороны научно-исследовательской работы. Исследование имеет ряд значительных

преимуществ, угрозы для выполнения исследования не ставят под угрозу возможность его реализации.

2. При планировании исследования была построена ленточная диаграмма Гантта, которая позволяет скоординировать работу исполнителей в ходе выполнения исследования.
3. Составлена смета научного исследования, с помощью которой можно оптимизировать затраты при проведении исследований. Примерная сумма для выполнения НИР составила 87 тыс. рублей.
4. Оценка ресурсоэффективности проекта показала, что высокий результат, что говорит об эффективной реализации научного исследования.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 4БМ5Б	ФИО Морозова Надежда Николаевна
-----------------	------------------------------------

Институт	ИФВТ	Кафедра	Наноматериалов и Нанотехнологий
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

Объектом исследования данной работы является силумин эвтектического состава. Поверхность образцов силумина подвергаются электровзрывному легированию порошками оксида иттрия и дополнительному облучению интенсивным электронным пучком. Области, в которых планируется применять данные разработки: кораблестроение, машиностроение и приборостроение, аэрокосмическая техника.

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

#### 1. Производственная безопасность

1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
- предлагаемые средства защиты;
- (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).

1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- механические опасности (источники, средства защиты);
- термические опасности (источники, средства защиты);
- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты).

Категория тяжести работ 1б, условия микроклимата вне зависимости от сезона года остаются благоприятными и соответствуют нормам. Исследования ведутся в помещении с комбинированным освещением, все значения лежат в пределах допустимых. Но в связи с выделением в рабочую зону металлов, в виде пыли с разным размером частиц, необходимо снабжать сотрудников средствами индивидуальной защиты, так как наибольшая концентрация в области работ.

При выполнении работ возможно короткое замыкание цепи электропроводки, в цепь установлены автоматические выключатели, которые предотвратят возгорание. При возникновении пожара в помещении присутствует огнетушитель и датчики дыма. Так же велика опасность получения травм при несоблюдении техники безопасности при выполнении шлифовально-полировальных работ. Необходимо инструктировать персонал

	и проводить обучение по работе на каждом из приборов во избежание несчастных случаев..
<b>2. Экологическая безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	Для охраны окружающей среды особое внимание необходимо уделить правилам утилизации металлической стружки, при возникновении радиации из-за нарушения целостности установки предпринять меры по защите населения. ПК не несет опасных и вредных воздействий на окружающую среду (атмосферу, гидросферу, литосферу). Люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с ГОСТ 12.2.007.13-88
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	Разработан ряд действий в результате возникновения пожара и мер по ликвидации его последствий. В помещении имеется огнетушитель химический порошковый ОП ручной 5 литров
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	Персонал, работающий в помещении должен удовлетворять следующим требованиям: возраст не менее 18 лет; прохождение инструктажа по ТБ и ПБ; знание и соблюдение правил внутреннего распорядка отдела. А также должно соблюдаться законодательство о труде и охране труда Организация государственного надзора и контроля за соблюдением законодательства о труде и охране труда определена ст. 20 ФЗ «Об основах  охраны труда в РФ» и ст. 353-369 ТК РФ.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф.ЭБЖ	Раденков Т.А.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Морозова Надежда Николаевна		

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

В данной ВКР деятельности рассматривается вопрос об анализе структуры и свойств эвтектического силумина, синтезированного комбинированным методом, сочетающим электровзрывное легирование и последующее облучение высокоинтенсивным импульсным электронным пучком

Практическая деятельность связана с изучением поверхности: образцы подготавливаются с помощью шлифовально-полировального станка «Полилаб» к легированию на установке «Соло», после чего поступают обратно в лабораторию, где проводятся исследования с помощью микротвердометра МР-3 и металлографического микровизора  $\mu$ Vizo - МЕТ-221.

Лаборатория оборудована отдельными рабочими местами для всех сотрудников и студентов, с предоставлением средств индивидуальной защиты. В лаборатории присутствует, как искусственное освещение, так и естественное. Кроме того, работа проходит в помещениях оснащённых электроприборами, за которыми необходим особый уход и выполнение правил техники безопасности.

### **5.1 Производственная безопасность**

Для определения безопасности выполняемых работ необходимо определить возможные вредные и опасные факторы. Вид работы выполняемой относится к легкой, включает в себя подготовку поверхности на шлифовальном станке и исследование структуры с помощью металлографического микровизора, изучение твёрдости.

Таблица 5.1 – Виды производимых работ и факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Ф а к т о р ы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ )	
	Вредные	Опасные
Работа за шлифовально-полировальной машиной	Повышенная запыленность рабочей зоны, монотонность труда, шум	Движущие детали машин и механизмов
Работа за микротвердометром	Монотонность труда, перенапряжение анализаторов (глаза)	-
Работа за микроскопом с возможностью фотографии	Монотонность труда, перенапряжение анализаторов (глаза)	-

### *Микроклимат*

Для создания благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения. Рабочая зона ограничивается высотой 2,2 м над уровнем пола, где находится рабочее место. При этом нормируются: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха [38].

При неблагоприятных условиях не возникает повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут наблюдаться дискомфортные теплоощущения, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности.

В производственных помещениях, в которых величины показателей микроклимата невозможно довести до уровня допустимых, рабочие места следует рассматривать как вредные.

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата должны быть использованы защитные мероприятия, например, системы местного кондиционирования воздуха, применение средств индивидуальной защиты (СИЗ), регламент времени работы и т.д. К числу СИЗ от неблагоприятных климатических условий относят спецодежду, спецобувь, средства защиты рук и головные уборы. В России эти средства должны выдаваться бесплатно на определенный срок носки [39].

Таблица 5.2 – Условия микроклимата

Сезон года	Катег. тяжести выполняемых работ	Температура, С <sup>0</sup>		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/сек	
		Фактич. значение	Допустим. значение	Фактич. значение	Допустим. значение	Фактич. значение	Допустим. значение
Холодный	Легкая (1б)	20	19-24	50	15-75	0,1	0,1-0,2
Теплый	Легкая (1б)	24	20-28	50	15-75	0,2	0,1-0,3

Из табл.5.2 следует, что условия труда являются благоприятными. Условия микроклимата вне зависимости от времени года остаются в пределах допустимых значений, благодаря вентиляции и отоплению.

### *Освещение*

Освещение — неотъемлемый элемент условий трудовой деятельности человека. При правильно организованном освещении рабочего места обеспечивается сохранность зрения человека и нормальное состояние его нервной системы, а также безопасность в процессе производства. Нормируемым показателем является коэффициент естественной освещенности (КЕО), устанавливаемый для различных помещений с учетом их назначения, характера и точности выполняемой работы. При выполнении

работ средней точности КЕО составляет 1,2-4 %, КЕО характеризует процентное отношение освещенности внутри помещения к освещенности вне него. Естественное и искусственное освещение регламентируется нормами СНИП 23-05-95. Предельно допустимый уровень освещенности составляет 500 лк [40].

Недостаточная освещенность вызывает преждевременное зрительное утомление. При недостаточной освещенности производственных цехов промышленных предприятий, аналитических лабораторий у рабочих ухудшается зрение, уменьшается производительность труда и снижается качество работы.

Освещение аналогично микроклимату соответствует нормам табл.5.3.

Таблица 5.3 – Освещённость и её параметры

Наименование рабочего места	Тип светильника и источника света	Коэффициент естественной освещенности, КЕО, %		Освещенность при совмещенной системе, лк	
		Фактический	Норм. значение	Фактический	Норм. Значение
Аналитическая лаборатория	Комбинированное освещение	2,2	2,1	650	500

#### *Электромагнитные воздействия*

Электромагнитные воздействия на организм, вызванные работой за электрооборудованием и установками должны быть дозированы и проходить в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4/1340-03. ПДУ не должно превышать норму данную в табл.5.4. То есть работа не должна превышать 2 часа без перерыва, который должен составлять не менее 15-20 минут. Для предупреждения развития переутомления обязательными мероприятиями, в частности проведение гимнастики глаз каждые 20 минут, проведения физических упражнений продолжительностью 1-2 минуты для снятия

напряжения. Так же необходимо применять средства профилактики неблагоприятного влияния ПЭВМ: приэкранные защитные фильтры для видеомониторов, нейтрализаторы электрических полей промышленной частоты, что приведет к снижению напряжения глаз, снижению электрического поля и уменьшению бликов изображения [41].

Таблица 5.4 – ПДУ ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

### *Шум*

На рабочем месте так же возможно возникновение шумового загрязнения воздуха в следствии работы установки, предназначенной для полировки.

Согласно СНИП 23-03-2003 допустимые значения для лабораторий и административно-управленческого персонала уровни шума приведены в таб.5.5 [42].

Таблица 5. 5 - Допустимые уровни шума

Тип помещения	Время суток	Максимальный уровень звука, дБА
Аналитическая лаборатория	-	70

Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается производительность труда и качество выполняемой работы [39].

Защита от шума должна обеспечиваться разработкой шумобезопасной техники, применением средств и методов коллективной защиты, в том числе строительно-акустических, применением средств индивидуальной защиты. В первую очередь следует использовать средства коллективной защиты. По отношению к источнику возбуждения шума коллективные средства защиты подразделяются на средства, снижающие шум в источнике его возникновения (за счет улучшения конструкции машины или изменения технологического процесса), и средства, снижающие шум на пути его распространения от источника до защищаемого объекта (акустическую обработку помещений, применение звукоизоляции). Средства индивидуальной защиты (СИЗ) применяются в том случае, если другими способами обеспечить допустимый уровень шума на рабочем месте не удастся. Наиболее эффективны СИЗ, как правило, в области высоких частот. СИЗ включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы [43].

Известно, что станок «Полилаб» отличается пониженным уровнем шума, даже на высоких частотах вращения шлифовального круга, около 50 дБА.

### *ПДК*

Основным воздействием является ПДК веществ в рабочей зоне при проведении шлифовально-полировальных работ, так как в процессе шлифовки и полировки, вещество может всплываться и находиться в воздухе рабочей зоны некоторое время, так же вещества могут вступать во взаимодействие с кислородом, что неизбежно будет приводить к окислению металла.

Таблица 5. 6 - ПДК веществ, присутствующих в воздухе рабочей зоны [44]

Вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Действие на организм
----------	---------------------------	--------------------	----------------------

Алюминий	2	3	Механическое повреждение тканей
Оксид иттрия	2	3	Механическое повреждение тканей
Кремний	4	3	Механическое повреждение тканей

Большинство веществ, представленных выше, приводят к механическому повреждению тканей дыхательных путей, слизистых глаз, носоглотки. Соответственно необходимо соблюдать гигиенические нормы по проветриванию помещения и предоставить сотрудникам СИЗ для защиты глаз и органов дыхания, а также халаты. В процессе выполняемых работ могут выделяться частицы металлов в наноразмерном состоянии. Так как не существует Гостов и СанПинов по защите от наночастиц, то считается рациональным использование ТР ТС 019/2011. Согласно данному документу СИЗ для защиты от механических повреждений должны обладать стойкостью от истиранию и проколам, так же халты, выдаваемые для защиты кожных покровов от механического воздействия, должны выдерживать разрывную нагрузку не менее 400 Н. Для защиты глаз рационально использование защитных очков со следующими характеристиками: без выступов, без дефектов, светопропускание не должно снижаться за 30 минут более, чем на 10 %. Для защиты органов дыхания необходимо использовать респираторы, каждый из которых имеет свой индивидуальный номер, площадь зрения не должна снижаться при использовании более чем на 30 %. Объемная доля кислорода должна быть около 21 % [45].

### *Шлифование*

На рабочем месте при выполнении работ с шлифовально-полировальным оборудованием необходимо соблюдать правила техники безопасности, т.к. возможны механические опасные факторы, в соответствии с РД 153-34.0-03.292-00 [46]:

1. К самостоятельной работе на шлифовальных станках допускается обученный персонал, прошедший медицинский осмотр, инструктаж по

охране труда на рабочем месте, ознакомленный с правилами пожарной безопасности и усвоивший безопасные приемы работы.

2. Шлифовщику разрешается работать только на станках, к которым он допущен, и выполнять работу, которая поручена ему руководителем цеха (участка).

3. Рабочий, обслуживающий шлифовальные станки, должен иметь: костюм хлопчатобумажный или полукомбинезон, очки защитные, ботинки юфтевые

4. Если пол скользкий (облит маслом, эмульсией), рабочий обязан потребовать, чтобы его посыпали опилками, или сделать это сам.

#### *Электробезопасность*

Так же необходимо учитывать, что все оборудование в лаборатории является электрическим, что неизбежно ведет к соблюдению ГОСТ Р 12.1.019-2009 [47]:

Технические способы и средства защиты, обеспечивающие электробезопасность, должны устанавливаться с учетом:

- номинального напряжения, рода и частоты тока электроустановки;
- способа электроснабжения (от стационарной сети, от автономного источника питания электроэнергией);
- режима нейтрали (средней точки) источника питания электроэнергией (изолированная, заземленная нейтраль);
- вида исполнения (стационарные, передвижные, переносные);
- условий внешней среды: особо опасные помещения, помещения с повышенной опасностью, помещения без повышенной опасности, территории открытых электроустановок.

Пожаробезопасность является одним из приоритетных направлений обеспечения безопасности в лаборатории. Одной из причин пожара может быть замыкание электропроводки, что должно быть исключено [48].

Меры предосторожности от короткого замыкания:

- необходимо следить за исправностью изоляции электропроводов, не допускать крепления их гвоздями, которые могут нарушить изоляцию. Проведите замер сопротивления электропроводки, в организации, имеющей лицензию на данный вид работ;

- в процессе эксплуатации электропроводки должны быть исключены любые механические воздействия на нее: нельзя подвешивать на проводе осветительную аппаратуру, заземлять провода дверьми, вытягивать за шнур вилку из розетки, перекручивать и завязывать провода, подвешивать их на гвоздях. Особенно опасно в зоне размещения скрытой проводки произвольное вбивание гвоздей, пробивание отверстий под дюбели и др.

- не включайте большое количество электроприборов в розетку, это может вызвать короткое замыкание и пожар;

- когда вы закончили пользоваться удлинителем, сначала выдерните вилку из розетки, а затем уже сворачивайте его;

- обнаруженные оголенные места и обрывы электропроводов надо немедленно ремонтировать;

- не делайте временных соединений проводов, предоставьте выполнение всех работ квалифицированным специалистам;

#### *Пожарная безопасность*

Так же необходимо создать систему противопожарной защиты:

1) применение объемно-планировочных решений и средств, обеспечивающих ограничение распространения пожара за пределы очага;

2) устройство эвакуационных путей, удовлетворяющих требованиям безопасной эвакуации людей при пожаре;

3) устройство систем обнаружения пожара (установок и систем пожарной сигнализации), оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре;

4) применение систем коллективной защиты (в том числе противодымной) и средств индивидуальной защиты людей от воздействия опасных факторов пожара и другие.

## 5.2 Экологическая безопасность

Региональная безопасность предусматривает комплекс мер по защите и охране регионов при проведении, в данном случае, экспериментов и работы с материалами находящимися в наноразмерном диапазоне. При производимых манипуляциях с образцами, подвергнутыми шлифовально-полировальным работам, так как это является источником загрязнения, необходимо предпринять предупреждающие меры по минимизации или полному исключению загрязнения окружающей среды. Материалы могут всплываться, и оставаться в воздухе, после чего они могут перемещаться воздушными потоками за пределы лаборатории, осаждаюсь загрязнять литосферу, проникать в подземные и наземные воды, выноситься из лаборатории человеком на одежде и коже.

Доля материала, проникающая в окружающую среду, не превышает допустимых норм, поэтому нет необходимости в создании санитарной зоны. Так как установка компактная, то особых требований не предъявляется к размещению, за исключением устойчивости и удобства работы сотрудников.

Защита атмосферы предполагает минимизацию проникновения порошка в нее, и не превышения ПДК в воздухе приведенных в табл. 5.5.

Проникновение в гидросферу обусловлено обслуживанием установки, ее мойки, и так же мойки рук. Для минимизации попадания лаборатория должна быть оборудована отстойниками, в которых порошок будет происходить коагуляция и седиментация. На данный момент не прописано в ГН 2.1.5.2280-07 о ПДК веществ, с которыми проводятся манипуляции, поэтому необходимо предпринимать те же меры защиты от проникновения в воду, как и для особо опасных. Аналогично необходимо поступать, если отходы после манипуляций с образцами удаляются в сухом виде, так как проникновение в литосферу должно быть минимизировано.

### 5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Возможные чрезвычайные ситуации: пожары, взрыв, различного рода излучение.

Наиболее типичная ЧС на данном производстве-пожар из-за взрыва или электрического замыкания.

Превентивные меры включают в местах наибольшей вероятности возникновения очага возгорания размещения песка, огнетушителей. Число огнетушителей должно соответствовать предполагаемой площади пожара.

Персонал должен в обязательном порядке проходить инструктаж по работе с оборудованием и противопожарной безопасности. Особое внимание необходимо уделить электропроводке.

Спасательные работы проводятся с обязательным применением средств индивидуальной защиты.

Использование средств индивидуальной защиты органов дыхания - наиболее эффективный способ защиты населения в реальных условиях заражения окружающей среды сильнодействующими ядовитыми веществами. Этот способ широко применяют на химических производствах для защиты промышленно-производственного персонала. По мере накопления средств индивидуальной защиты в ближайшие годы он найдет также широкое применение и для защиты населения, проживающего вблизи химически опасных объектов.

Противогазы для обеспечения населения (гражданские противогазы) в настоящее время хранят на складах органов местной власти, в основном в загородной зоне; для обеспечения рабочих и служащих - непосредственно на химически опасных объектах.

При возникновении неисправности в работе оборудования для напыления и впавления покрытий возможно воздействие в виде ионизирующего излучения на персонал и окружающую среду. Необходимо

предусмотреть средства фиксации данного излучения в виде счетчика Гейгера и предпринять превентивные меры по защите селитебной зоны.

Ионизирующее излучение - это излучение, сопровождающее радиоактивный распад, энергия которого достаточна для ионизации облучаемой среды (биоткани, воздуха и пр.).

Ионизация - акт разделения электрически нейтрального атома на отрицательный электрон и положительный ион.

Результате ионизации молекул воды в организме человека образуются свободные радикалы, которые, взаимодействуя с молекулами белка, ферментов и других элементов биоткани ведут к разрушению ее клеток, нарушению жизнедеятельности отдельных систем и организма в целом. Возникает лучевая болезнь.

#### **5.4 Особенности законодательного регулирования проектных решений.**

Продолжительность рабочего времени конкретного работника устанавливается трудовым договором на основании отраслевого (межотраслевого) соглашения и коллективного договора с учетом результатов специальной оценки условий труда.

Кроме того, запрещается применение труда женщин на тяжелых работах и работах с вредными условиями труда [48]. Запрещается применение труда лиц моложе 18 лет на тяжелых работах и работах с вредными и опасными условиями труда. Все лица моложе 18 лет принимаются на работу после предварительного медосмотра и в дальнейшем до достижения 18 лет ежегодно подлежат медосмотру.

**Виды компенсаций, предусмотренные российским законодательством работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда [49]:**

1. Сокращенная продолжительность рабочего времени, устанавливаемая для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда (ст.92, 94 ТК).

2. Ежегодные дополнительные отпуска, которые устанавливаются работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда (ст.117 ТК).

3. Оплата труда работников в повышенном размере, занятых на тяжелых работах, работах с вредными и (или) опасными и иными особыми условиями труда (ст.147 ТК)

4. Молоко или другие равноценные пищевые продукты, выдаваемые работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда бесплатно по установленным нормам (ст. 222 ТК).

5. Лечебно-профилактическое питание для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда бесплатно по установленным нормам (ст. 222 ТК)

6. Досрочное назначение трудовой пенсии для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, на работах в особых условиях труда (ст.27 и 28 Федерального закона «О трудовых пенсиях в Российской Федерации»).

**Государственный надзор** и контроль за соблюдением законодательства о труде и охране труда Организация государственного надзора и контроля за соблюдение законодательства о труде и охране труда определена ст. 20 ФЗ «Об основах| охраны труда в РФ» и ст. 353-369 ТК РФ.

Во избежание влияния вредных факторов при работе на приборах и выполнении монотонной работы, требующей большого напряжения зрения рекомендуется каждый час делать 15 мин перерывы, а так же выполнять профилактические меры (гимнастика). Во избежание опасных факторов при выполнении работ рекомендуется придерживаться техники безопасности при работе с указанным выше видом оборудования. Требуется проводить

периодические проветривания помещения, проводить влажную уборку рабочего места в конце рабочего дня.

Поскольку большинство работ по исследованию материала, таких как измерение твердости, получение изображений по средствам оптического микроскопа, обработка данных производятся в сидячем положении, нужно создать благоприятные условия для работы сотрудникам. Должно быть обеспечено оптимальное положение персонала, высота сидения должна быть для женщин 400 мм, для мужчин 430, а высота рабочей поверхности 870 (это усредненное значение, как для мужчин, так и для женщин)[36].

В лаборатории на случай воспламенения должен располагаться огнетушитель, эта зона должна быть выделена красным цветом для обозначения принадлежности к пожарной технике, средствам противопожарной защиты. А так же красным цветом нужно обозначить внутренние поверхности крышек шкафов с открытыми токоведущими элементами оборудования, если таковые располагаются в лаборатории[37].

Необходимо организовывать перерывы для отдыха и питания согласно статье 108 ТК РФ в течении рабочего дня. Необходимо предоставлять служащим перерыв продолжительностью не менее 30 минут и не более 2 часов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований сформулировано следующее заключение:

1. Показано, что в литом состоянии силумин эвтектического состава является многофазным материалом и содержит, кроме фаз на основе твердых растворов алюминия и кремния, интерметаллидные соединения различного состава. Частицы кремния и интерметаллидов имеют разнообразную форму (глобулярную, пластинчатую, игольчатую или скелетообразную) и, следовательно, могут не только упрочнять материал, но и являться источниками микротрещин при эксплуатации изделий.

2. Электровзрывное легирование силумина эвтектического состава сопровождается формированием высокопористого поверхностного слоя толщиной до 50 мкм, характеризующегося неоднородностью в распределении легирующих элементов (иттрия и кислород), субмикро- и наноразмерной многофазной структурой, высокими (многократно превышающими значения силумина литого состояния) значениями износостойкости и микротвердости.

3. Дополнительное облучение поверхности электровзрывного легирования силумина интенсивным импульсным электронным пучком сопровождается формированием высокоплотного слоя, толщина которого, в зависимости от длительности импульса пучка электронов (50-200 мкс) изменяется в пределах от 60 мкм до 340 мкм. Микротвердость модифицированного поверхностного слоя почти в 2 раза превышает микротвердость литого силумина и снижается с увеличением длительности импульса пучка электронов. Износостойкость силумина в лучшем случае (при длительности импульсов пучка электронов 200 мкс) превышает износостойкость литого силумина в  $\approx 16$  раз.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Морозова Н.Н., Клопотов А.А., Иванов Ю.Ф. Модифицирование силумина электровзрывным методом // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении». - Юрга, 18–20 мая 2017 г. – С. 24-28.

2. Морозова Н.Н., Толкачев О.С., Клопотов А.А., Иванов Ю.Ф. Формирование наноструктурного состояния при легировании поверхности силумина иттрием в присутствии атомов кислорода // Труды VI Международной научной конференции для молодых ученых «Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы» (Саратов, 15 - 16 мая 2017 года), принято к опубликованию.

3. Доклад, представленный на VI Международной научной конференции для молодых ученых «Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы» (Саратов, 15 - 16 мая 2017 года), по результатам конкурсного отбора получил Гран-при конференции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Концентрированные потоки энергии. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> - свободный
2. Нанокристаллический материал. [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://www.ai08.org> - свободный
3. Термическая обработка металлов. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> - свободный
4. Модифицирование металлов и сплавов. [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://dic.academic.ru> - свободный
5. Легирование (металлургия). [Электронный ресурс]. - режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> – свободный
6. Электровзрывное легирование. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://www.livelib.ru> – свободный
7. Сплав. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> - свободный
8. Об алюминии. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://aluminiumleader.ru> – свободный
9. Кремний. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://dic.academic.ru> - свободный
10. Эвтектика. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://metallurgicheskiy.academic.ru> – свободный
11. Микротвердость. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.modificator.ru>
12. Износостойкость. [Электронный ресурс]. - режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> – свободный
13. Коэффициент трения. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://dic.academic.ru> – свободный

14. Эвтектические силумины: алюминий и 12 % кремния. [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://aluminium-guide.ru> - свободный

15. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные

16. Сплавы алюминиевые литейные (по ГОСТ 1583-93). [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://ukrbascompany.at.ua> - свободный

17. Карпий С.В. [Автореферат] / Карпий С.В. // Автореферат диссертации: Особенности поверхностного упрочнения титана при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке. Новокузнецк-2011. – 150 с.

18. Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А., Филимонов С.Ю., Вострецова А.В., Будовских Е.А. Формирование структуры и свойств стали при комплексной электровзрывной и электронно-пучковой обработке // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2008 №12. с.43-48

19. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. - Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. - 301 с.

20. Осколкова Т.Н., Будовских Е.А. Упрочнение Поверхности Карбидовольфрамового Твёрдого Сплава Способом Электровзрывного Легирования // Современные Научные Технологии. 2010. №7.

21. Формирование нанокompозитных слоёв на поверхности металлов при электровзрывном легировании / Е.А. Будовских, А.В. Вострецова (А.В. Ионина), Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов // Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов 'ДСМСМС-2008': Тез. докл. XI Междунар. конф. 10–14 апр. 2008. – Екатеринбург, 2008. – С. 56–57.

22. Будовских Е. А. [Автореферат] / Будовских Е. А. // Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании/ Новокузнецк – 2012.

23. Ivanov Yu. F., Kobzarev T. Yu., Raikov S. V., Gromov V. E., Soskova N. A., Budovskikh E. A. Modification of the Surface of the VT6 Alloy by Plasma of Electric Explosion of a Conducting Material and by Electron Beam // Russian Journal of Non-Ferrous Metals.- 2014. – V.55, №1. – P.51-56.

24. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов: Монография / К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк и др. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 640 с.

25. Иванов Ю.Ф. Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Клопотов А.А., Иванов К.В. Структура системы пленка (Si)/подложка (технически чистый титан), формирующаяся в условиях облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком/ Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 2014, том 11, №1

26. Е.А. Маркова, Ю.Ф. Иванов. Обработка поверхности образцов силумина высокоинтенсивным электронным пучком. Хvii Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии»секция материаловедение.

27. А.В. Ткаченко, Е.А. Петрикова, Ю.Ф. Иванов. Модификация поверхностного слоя силумина с помощью комбинированной обработки / Перспективы развития фундаментальных наук: Труды XI Международной конференции студентов и молодых учёных. Россия, Томск 22-25 апреля 2014г. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С.956 – 958

28. Шмаков Н.А. Основы рентгеноструктурного анализа рентгеноструктурный анализ поликристаллических материалов на синхротронном излучении [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://chem21.info/info/290293/> - свободный

29. Электронная микроскопия [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://nsau.edu.ru> - свободный

30. Сканирующая электронная микроскопия [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://dic.academic.ru> – свободный

31. Белов Н.А. Фазовый состав и структура силуминов / Н.А. Белов, С.В. Савченко, А.В. Хван. - М.: МИСИС, 2008. - 282 с.
32. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов - М.: МИСиС, 2005. - 376 с.
33. Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. - М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 392 с.
34. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Metallurgia, 1977.
35. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
36. Майсак О. С. SWOT-анализ: объект, факторы, стратегии. Проблема поиска связей между факторами // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 1 (21). – с. 151–157.
37. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 36 с.
38. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
39. Лабораторный практикум по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех специальностей: учебное пособие. Ю.А. Амелькович, Ю.В. Анищенко, А.Н. Вторушина, М.В. Гуляев, М.Э. Гусельников, А.Г. Дашковский, Т.А. Задорожная, В.Н. Извеков, А.Г. Кагиров, К.М. Костырев, В.Ф. Панин, А.М. Плахов, С.В. Романенко – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 236 с.
40. СНИП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
41. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 -03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
42. СНИП 23-03-2003. Защита от шума.
43. ГОСТ 12.1.003-83. Шум общие требования безопасности.

44. ГН 2.2.5.686-98. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
45. ТР ТС 019/2001. О безопасности средств индивидуальной защиты.
46. РД 153-34.0-03.292-00. Типовая инструкция по охране труда при работе на шлифовальных станках.
47. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
48. Трудовой кодекс (ТК РФ ), N 197-ФЗ от 30.12.2001
49. Труд женщин и подростков [Электронный ресурс]. - режим доступа: <http://goga-bey.narod.ru/bjd/13.htm> — свободный

## Приложение А Results of the research and their discussion

### Раздел (3) Результаты и их обсуждение

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Морозова Надежда Николаевна		

Консультант кафедры наноматериалов и нанотехнологий:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. НМНТ	Иванов Юрий Федорович	Доктор ф.-м. наук, доцент		

Консультант – лингвист кафедры иностранных языков физико-технического института:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Татьяна Степановна Мыльникова			

### 3. RESULTS OF THE RESEARCH AND THEIR DISCUSSION

#### 3.1 Structure and properties of silumin of the eutectic composition in the initial state

The silumin of the eutectic composition, which is the material of the present study, contains copper, magnesium, iron, nickel and some other alloying and impurity elements. The presence of alloying and impurity elements contributes, on the one hand, to an increase in the strength properties of the material, and on the other hand, leads to a decrease in the crack resistance of silumin, which is due to the formation of intermetallides of lamellar morphology [31-32]. Characteristic images of the structure of the etched section of the investigated silumin obtained by scanning electron microscopy and demonstrating the multiphase, morphologically diverse nature of the material are shown in Fig. 3.1.

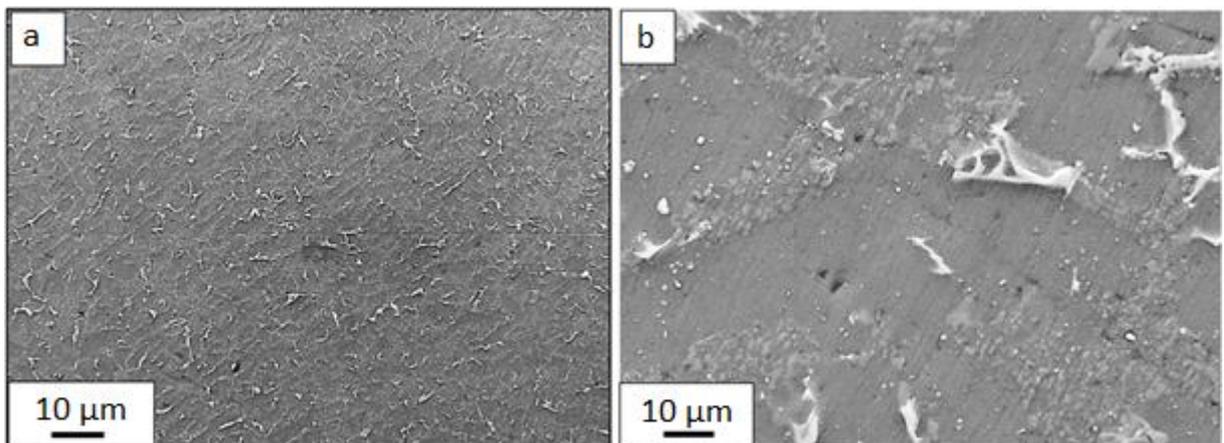


Figure 3.1 - Structure of the silumin of the AK12 brand, revealed by scanning electron microscopy of etched sections.

It can be seen clearly, especially with comparatively large magnifications (Fig. 3.1, b), that the segregations of the second phases have a diverse form. According to the metallographic studies presented in [31-34], in silmins by selective etching methods, lamellar inclusions of light gray color can be detected - phase  $\beta$  ( $\text{Al}_5\text{SiFe}$ ); Inclusions that are in the form of regular brown polyhedrons -  $\alpha$

phase ( $\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$ ); With a small amount of iron, the shape of the particles is similar to the Chinese characters; Inclusion of a gray oval-shaped shape - a silicon particle.

Methods of micro-X-ray spectral analysis make it possible to investigate the elemental composition of a locally selected inclusion. In Fig. 3.2 and in Table. 3.1 shows the results of this analysis of silumin. It is clearly seen that the alloying elements of the alloy are distributed in the material very heterogeneously, forming compounds that differ in size, contrast, morphology and elemental composition.

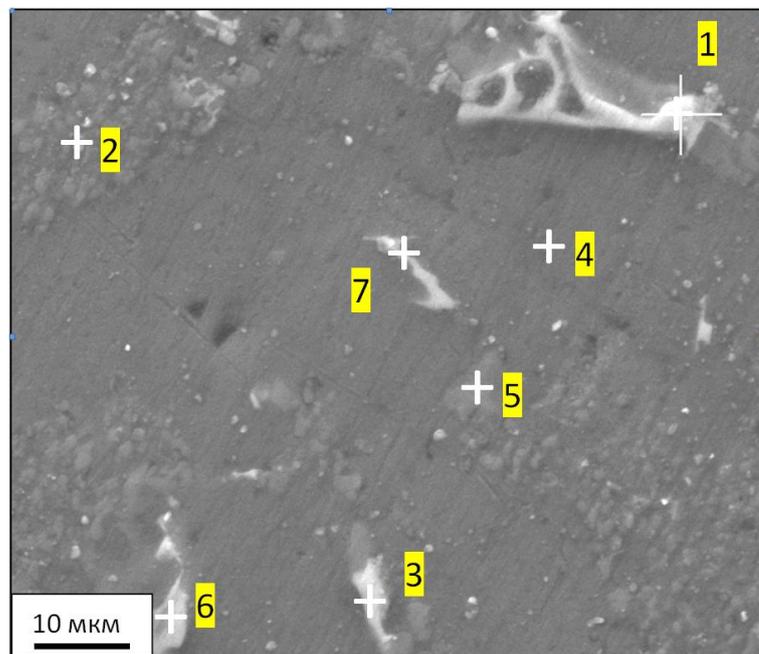


Figure 3.2 - Electron microscopic image of the silumin structure of the eutectic composition; The areas in which the micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of the material was performed. Scanning electron microscopy.

The phase composition of silumin was determined by X-ray diffraction analysis. The X-ray diffraction pattern obtained from the material under study is shown in Fig. 3.3. The results of the quantitative analysis of the X-ray diffraction pattern are given in Table 3.2. Analyzing the results presented in Table. 3.2, it can be noted that, as might be expected, the main phases of the investigated material are solid solutions based on aluminum and silicon.

Table 3.1 - Results of micro-X-ray spectral analysis of the surface area of the eutectic silumin, whose electron microscopic image is shown in Fig. 3.2.

Area	Element (balance Al, wt.%)				
	Si	Ni	Cu	Fe	Mn
1	0,6	13,5	13,3	0,0	0,0
2	8,7	0,3	2,2	0,0	0,0
3	1,7	11,8	14,0	0,0	0,0
4	0,5	0,2	1,3	0,0	0,0
5	22,5	1,1	1,6	1,2	0,0
6	1,1	14,8	15,8	0,5	0,0
7	2,3	17,2	5,2	2,7	0,6

Table 3.2 - Results of X-ray diffraction analysis of a sample of a eutectic silumin in a cast state

Phase	Contents, rel. %	Grid type	Lattice parameter, nm		Atomic radius, nm
			$a_0$	$a$	
Al	84,2	Fm3m	0,4050	0,40484	0,143
Si	12,3	Fm3ms	0,54307	0,54265	0,132

Note:  $a_0$  – is a table value;  $a$  – is the value in the alloy.

The parameters of the crystal lattices of aluminum and silicon in the investigated alloy are close to the parameters of the crystal lattices of pure elements, which indicates the stratification of these elements during crystallization of the alloy. X-ray phase analysis also revealed copper aluminide of AlCu<sub>3</sub> composition ( $\approx 3.5$  relative%), the diffraction maxima of which are indicated in Fig. 3 arrows.

Morphology and elemental composition of silumin in the initial state were analyzed by transmission electron diffraction microscopy using an attachment for energy-dispersive micro-X-ray spectral analysis (STEM method). The results of the studies performed are shown in Fig. 3.4 and Fig. 3.5.

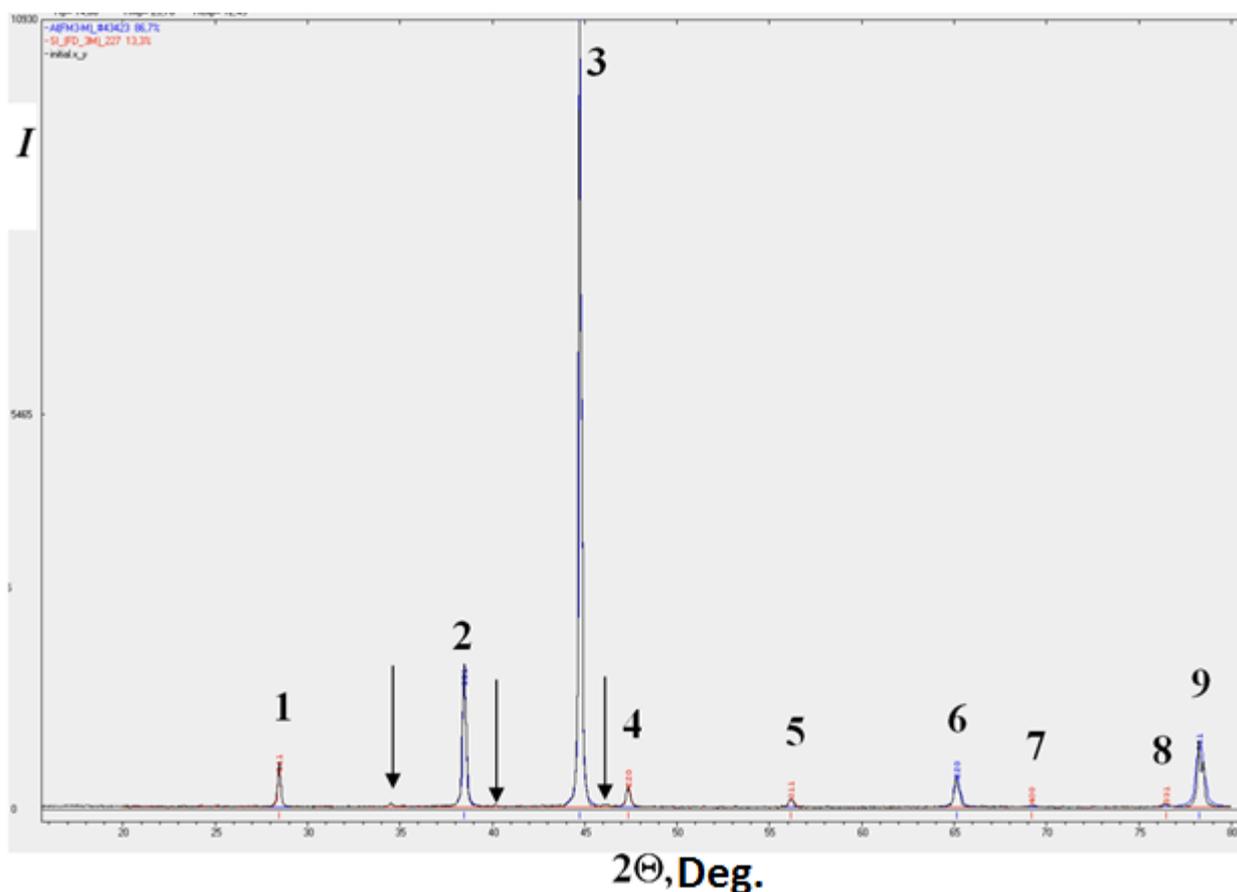


Figure 3.3 - Section of X-ray diffraction pattern of silumin of eutectic composition; The numerals denote the diffraction maxima of aluminum and silicon: 1 – (111)Si; 2 – (111)Al; 3 – (200)Al; 4 – (220)Si; 5 – (311)Si; 6 – (220)Al; 7 – (400)Si; 8 – (331)Si; 9 – (311)Al. Стрелками указаны дифракционные максимумы фазы  $AlCu_3$ .

In Fig. 3.4 shows the results of the study of the distribution of silicon and magnesium atoms in the eutectic silumine, revealed by the STEM methods. The elemental composition of the foil region shown in Fig. 3.4, is as follows (at%): 74.2% Al, 23.6% Si, 1.4% O, 0.6% Mg, 0.2% Fe.

In Fig. 3.5 shows other variants of the distribution of the atoms of the alloying elements contained in the investigated silumin, revealed by the methods of micro-X-ray spectral analysis (STEM method). The elemental composition of the foil sections shown in Fig. 3.5, is presented in Table. 3.3.

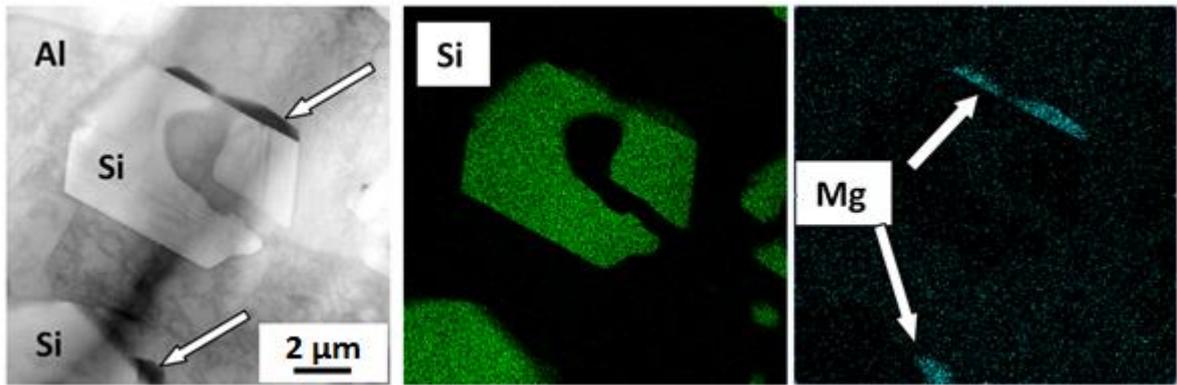


Figure 3.4 - Micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of silumin of the eutectic composition (SEM method).

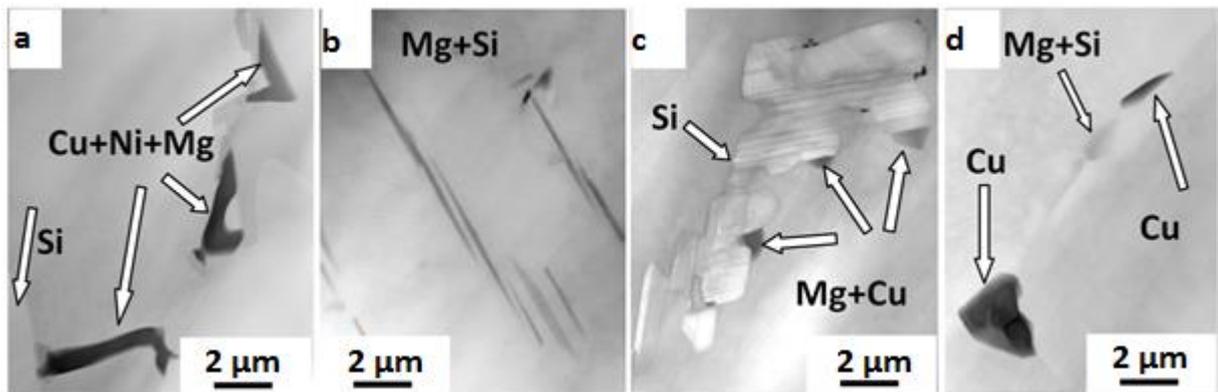


Figure 3.5 - Electron microscopic image of the silumin structure of the AK12 grade, obtained in the STEM analysis mode when studying the elemental composition of the material.

Table 3.3 - Results of the micro-X-ray spectral analysis of the characteristic sections of the eutectic silumin foil, the electron microscopic image of which is shown in Fig. 3.5.

Area	Element ( rest Al, heft. %)					
	Si	Ni	Cu	Fe	Mg	O
Fig. 5, a	9,2	1,2	1,8	0,3	2,0	0,0
Fig. 5, b	0,4	0,0	0,0	0,1	1,0	1,2
Fig. 5, c	15,9	0,0	0,8	0,0	0,6	0,8
Fig. 5, d	1,0	0,0	1,5	0,1	0,5	1,6

Following the results obtained by the SEM and STEM methods, it can be stated that the alloying elements present in the cast silumin of the eutectic

composition are distributed non-uniformly, forming inclusions having a diverse composition, shape, and dimensions.

Thus, the results obtained by the investigation of the cast silumin of a eutectic composition, revealed by X-ray diffraction, scanning and transmission electron diffraction microscopy, showed that the material is multiphase and contains, in addition to phases based on solid solutions of aluminum and silicon, intermetallide compounds of various compositions. Particles of silicon and intermetallides have a variety of shapes (globular, lamellar, acicular or skeletal) and, therefore, can not only strengthen the material, but also be the source of microcracks in the operation of products.

### **3.2 Structure and properties of silumin of a eutectic composition subjected to electrospray doping**

In Section 2 it was noted that the modification of the surface layer of silumin was carried out by an electric explosion method. Yttrium oxide powders of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composition were used as the alloying material. In Fig. 3.6 shows the results of the analysis of the surface of electric explosive doping of silumin. It can be clearly seen that as a result of processing silumin by a droplet-plasma flow, a surface layer is formed, characterized by a high level of roughness, containing in a large number of micropores, microcraters and microcracks. We note that the formation of such a structure is characteristic of the method of electric explosive doping and is one of its obvious shortcomings [35].

Using the micro-X-ray spectral analysis, the elemental composition of the surface layer of silumin, subjected to electrospray doping, was investigated. The results of the studies performed are shown in Fig. 3.7 and Table. 3.4.

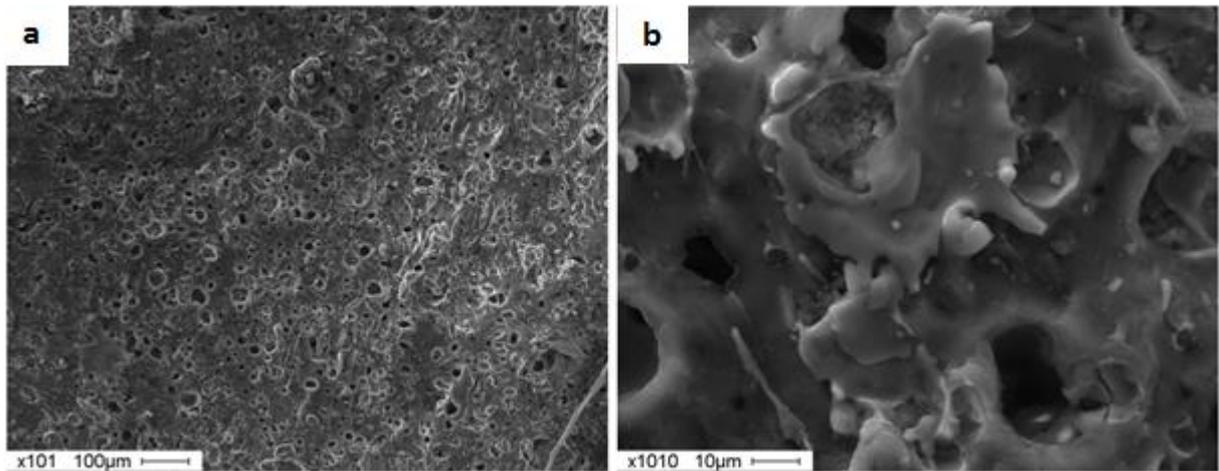


Figure 3.6 - Structure of the silumin surface of a eutectic composition subjected to electro spray doping. Scanning electron microscopy.

Table 3.4 - Elemental composition of the surface layer of silumin, subjected to electro spray doping, revealed by micro-X-ray spectral analysis of the regions shown in Fig. 3.7. Scanning electron microscopy. Results are presented in weight%.

Area	Al	Si	Mg	Ti	Fe	Ni	Cu	Y	O	C
Fig. 3.7, a	47,2	3,0	0,6	1,0	0,7	1,3	1,8	16,2	10,8	17,4
Fig. 3.7, b	0,8	0,0	0,0	0,2	0,7	0,5	0,7	34,0	28,1	35,0

Analyzing the results presented in Fig. 3.7 and in Table 3.4, it can be noted that electric explosive doping leads to the formation of a surface layer with a high level of inhomogeneity in the distribution of alloying elements, which is most noticeable in the distribution of yttrium and oxygen atoms. Namely, regions are identified (Figure 3.7, c) in which the concentration of yttrium and oxygen exceeds the average concentration of these elements by two or more times. These results confirm the fact of the presence in the plasma flow of powder particles of alloying material, previously identified in many studies [22].

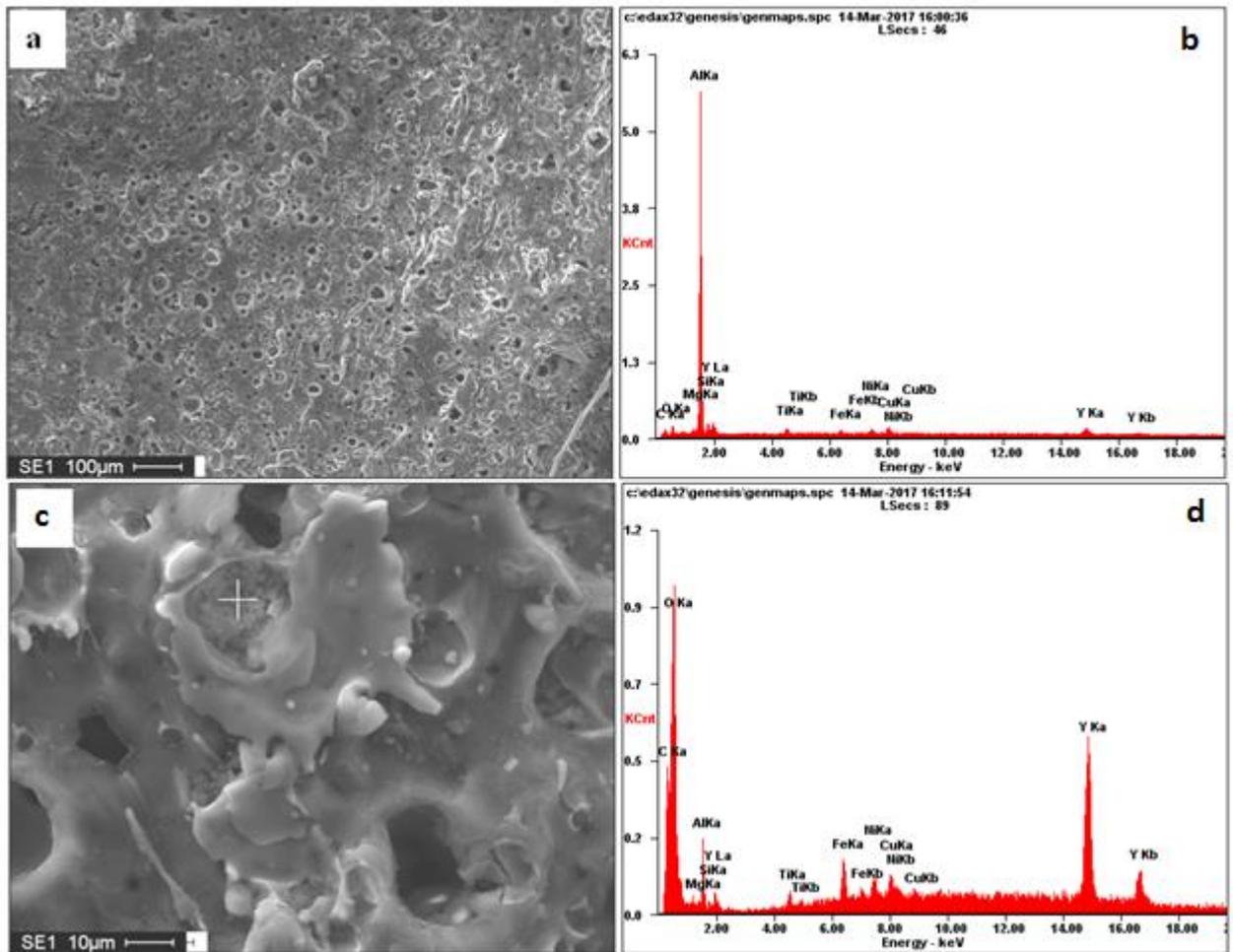


Figure 3.7 - Electron microscopic image of the structure of the surface of silumin treated with an electric explosion method (a, c), and the energy spectra (b) and (d) obtained from sections (a) and (b, the analysis area is denoted by +), respectively.

The volume structure of the silumin, subjected to electro spray doping, was analyzed by the cross-section method. A typical image of the structure of a doped layer, revealed by scanning electron microscopy, is shown in Fig. 3.8. Analyzing the data presented in Fig. 3.8 results, it can be noted, firstly, that the thickness of the modified layer varies within (30-50) μm. Secondly, a high level of porosity. Pores are located over the entire thickness of the modified layer; Pore sizes vary from units to tens of micrometers.

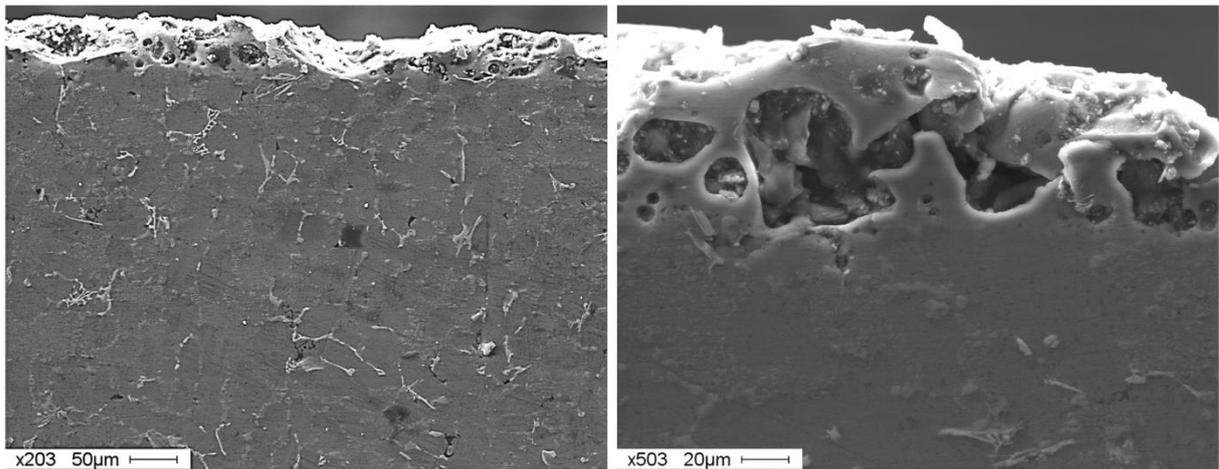


Figure 3.8. The structure of the transverse Silumin section of a eutectic composition subjected to electrospray doping. Scanning electron microscopy.

The phase composition of the modified silicone electrosurgical method was investigated by X-ray diffraction analysis. In Fig. 3.9 shows the radiograph obtained from the studied material. The quantitative results of the phase analysis of the material are presented in Table. 3.5.

Table 3.5 - Results of X-ray diffraction analysis of the silumin sample of a eutectic composition subjected to electrospray doping.

Phase	Contents, rel. %	The lattice arameter, Nm	D(OKP), Nm	$\Delta d/d, 10^{-3}$
Al	68.2	0,40485	75,01	0,24
Si	30.1	0,54231	16,4	0,80
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.7	1.06010	16,6	7,88

Analyzing the results presented in Table. 3.5, one can note, firstly, an essentially high level of silicon in the surface layer of silumin, which can indicate the evaporation of some aluminum layer during electrospray doping. Secondly, the presence of the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase, which may be due to the introduction of particles of the initial yttrium oxide powder into the surface layer of silumin in electric-explosive alloying.

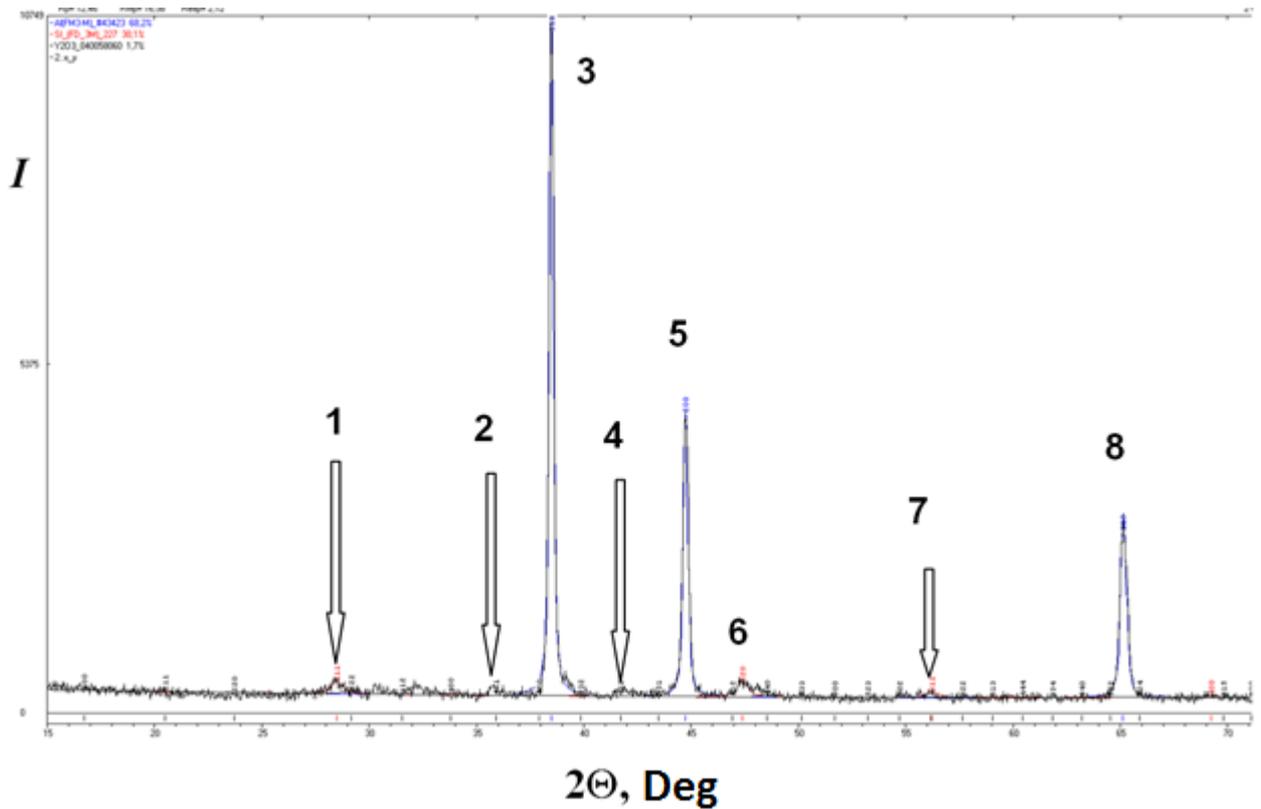


Figure 3.9 - Section of X-ray diffraction pattern of silumin of eutectic composition subjected to electro spray doping; The numerals denote the diffraction maxima of aluminum and silicon and  $Y_2O_3$ : 1 – (111)Si; 2 – (411)  $Y_2O_3$ ; 3 – (111)Al; 4 – (422)  $Y_2O_3$ ; 5 – (200)Al; 6 – (220)Si; 7 – (311)Si; 8 – (220)Al.

The defective substructure and phase composition of the silumin surface layer modified by the electric explosion method were analyzed by transmission electron diffraction microscopy of thin foils. It is established that as a result of high-speed cooling of the modified layer, which takes place during electro spray doping, the structure of cellular crystallization of aluminum is formed in the surface layer (Fig. 3.10, a). The size of the crystallization cells varies within (200-450) nm. On the boundaries of the cells there are layers of the second phase. Using micro-X-ray spectral analysis, it has been established that the interlayers are formed by silicon and yttrium atoms (Fig. 3.10, b, c).

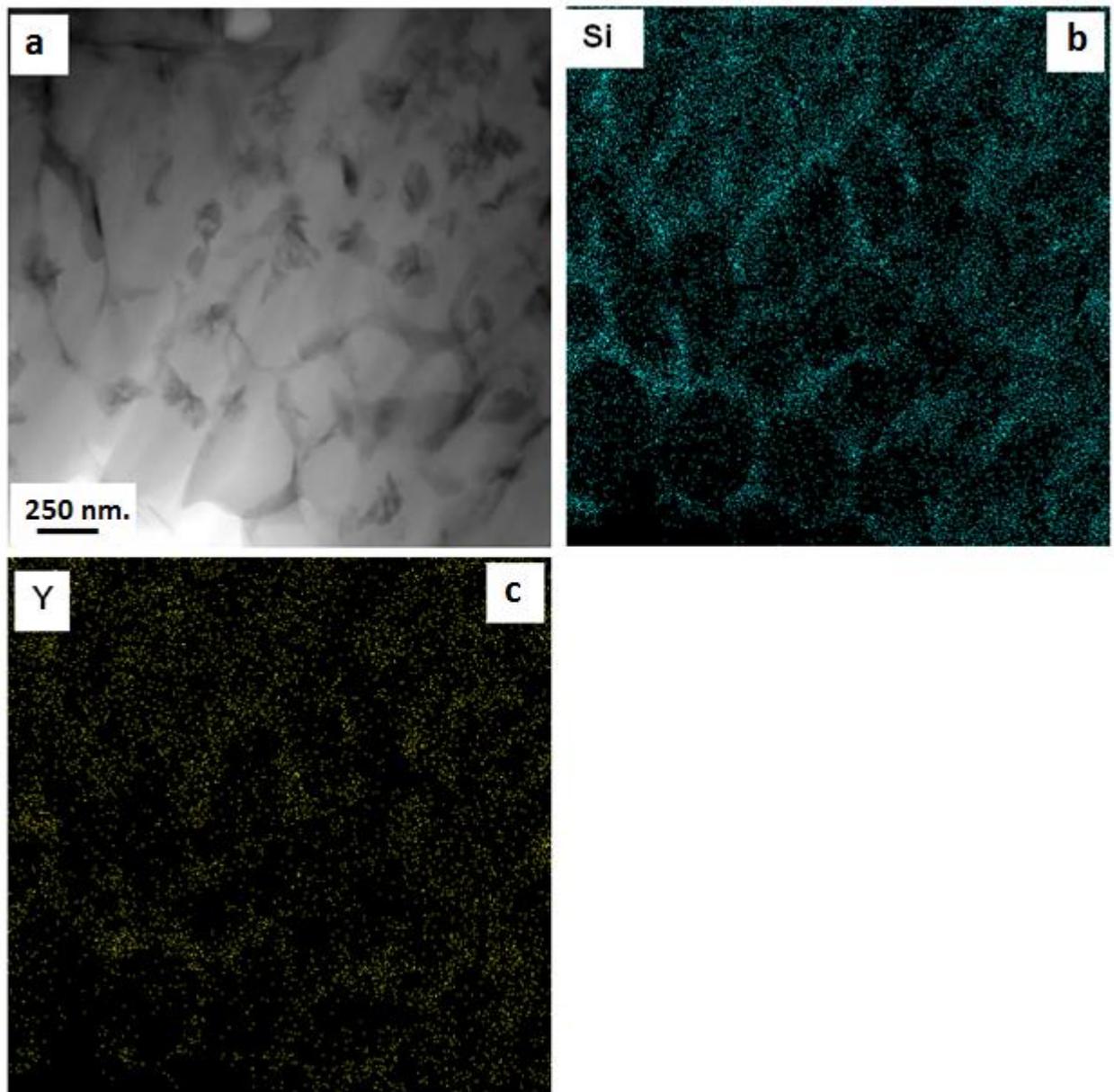


Figure 3.10 - Micro-X-ray spectral analysis of elemental composition of silumin of a eutectic composition subjected to electrospray doping (STEM method).

The results of a quantitative analysis of the elemental composition of the sample section shown in Fig. 3.10, a, are given in Table. 3.6. Attention is drawn to the low concentration of oxygen atoms, which can indirectly indicate the absence of an oxide phase at the boundaries of the crystallization cells.

Table 3.6 - Table of the results of micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of silumin, subjected to electrospray doping (weight%, Al - rest). The energy spectra are obtained from the sample section shown in Fig. 3.10, a.

Si	Mg	Cu	Ni	Fe	Ti	Y	O
6.8	1.4	0.0	1.0	0.5	0.0	1.5	0.5

Phase analysis of the surface layer of silumin, subjected to electrospray doping, was studied by transmission diffraction electron microscopy using the dark-field analysis technique and the indication of the corresponding microelectronograms. In Fig. 3.11. Electron microscopic images of the structure of cellular crystallization of silumin are given. It can be clearly seen that the cells have an oval shape. The cell sizes vary from 150 nm to 350 nm. Microdiffraction analysis showed that the cells are a solid solution based on aluminum (Figure 3.11, c). In the cell volume, by the methods of dark-field analysis, the particles of the second phase are detected; The particle sizes vary within a few nanometers (Figure 3.11, c).

The cells are separated by wide interlayers of the second phase, which have a nanoscale structure (Figure 3.11, d). Microdiffraction analysis revealed the presence of reflexes of the following phases: Al; Si; YSi<sub>2</sub> and Y<sub>2</sub> Si<sub>2</sub> O<sub>7</sub>. These results are in good agreement with the results of the micro-X-ray spectral analysis, shown in Fig. 3.10 from which it follows that the interlayers that separate the cells are enriched in silicon and yttrium atoms.

The mechanical properties of the modified silumin layer were investigated by determining the microhardness (load on the indenter 0.5 N). Due to the high level of roughness, it was not possible to determine the microhardness of the sample surface.

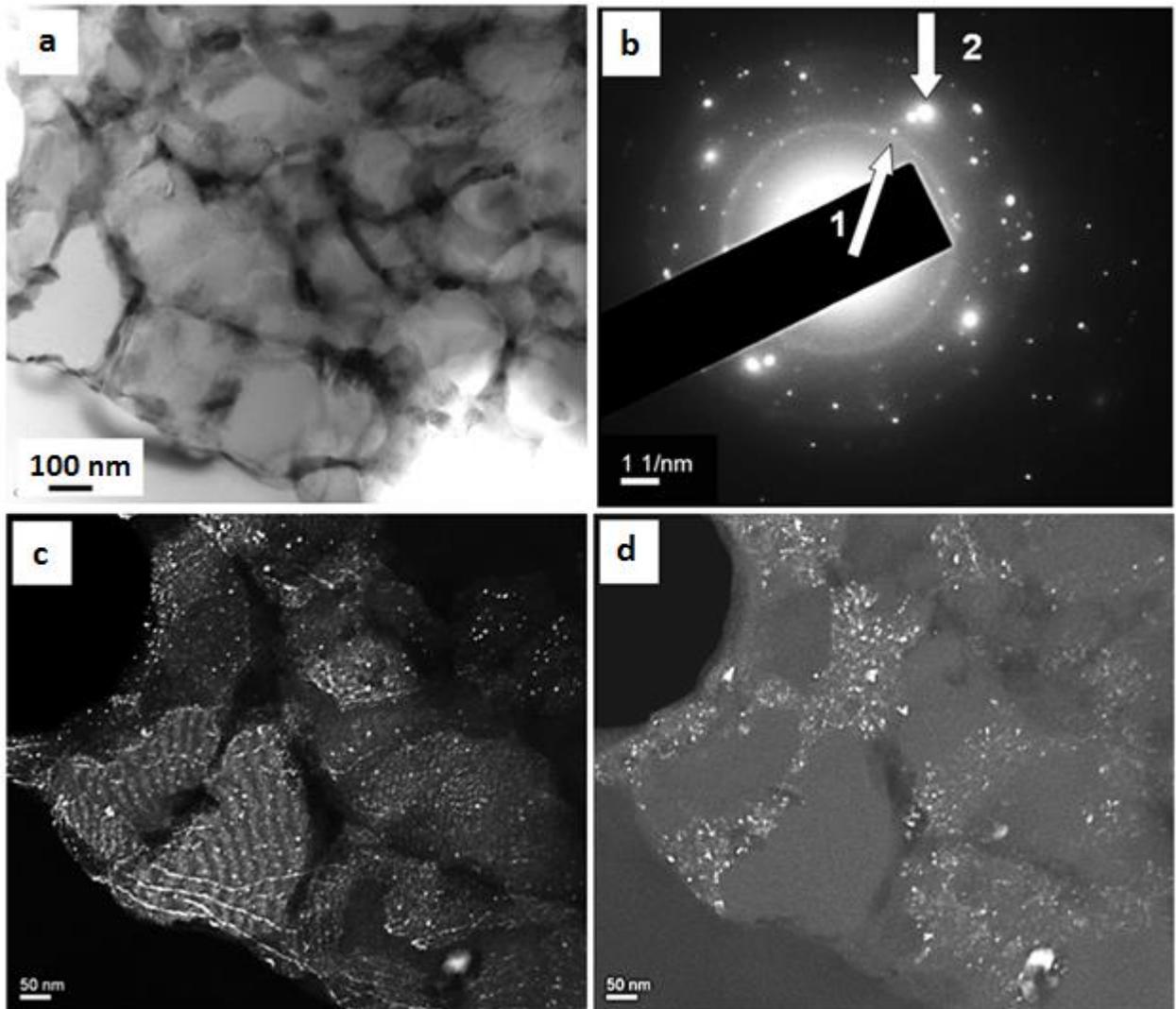


Figure 3.11 - Electron-microscopic image of the silumin structure of a eutectic composition subjected to electro spray doping; A is a bright field; B - microelectronogram, arrows indicate reflexes in which dark fields are obtained; C is the dark field obtained in the reflexes designated 2  $[111] \text{Al} + [112] \text{YSi}_2$ ; R is the dark field obtained in Ref. 1  $[111] \text{Si} + [111] \text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  (ring).

Determination of microhardness was carried out on transverse sections. The results of the study are shown in Fig. 3.12. As expected, the microhardness of the material is maximal at the surface of the modification and exceeds the microhardness of the starting material by more than 2 times. As the distance from the surface of the modification increases, the microhardness decreases and at a depth of  $\approx 70 \mu\text{m}$  reaches the microhardness of the original silumin.

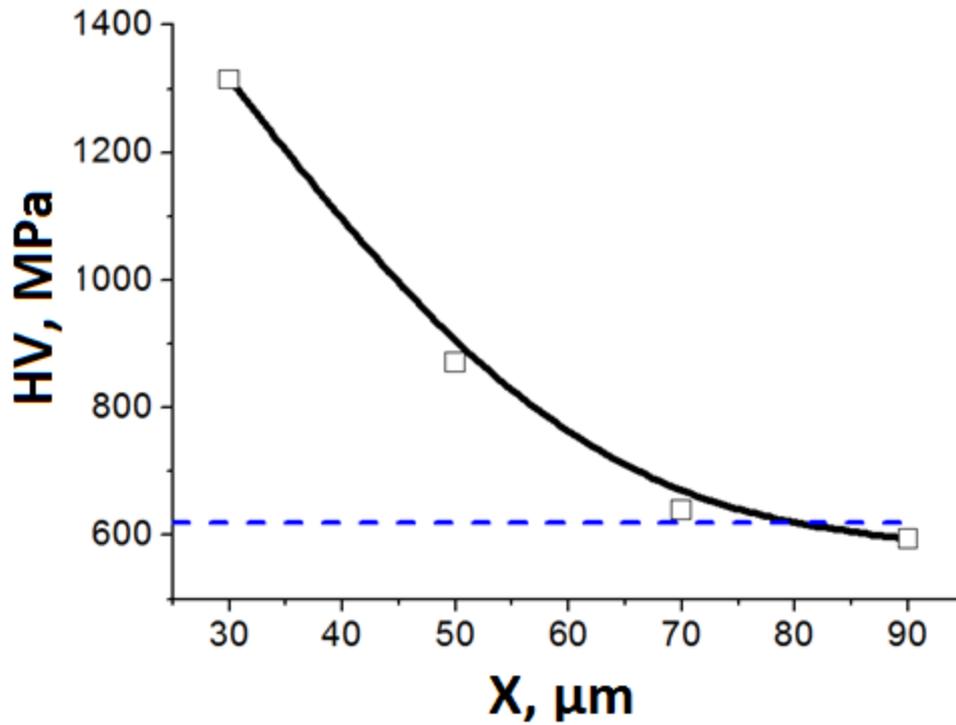


Figure 3.12. Profile of microhardness of silumin of eutectic composition subjected to electrospray doping.

The tribological properties of the modified silumin layer were studied, determining the wear resistance and friction coefficient (Table 3.7). In Fig. 3.13 shows the wear paths formed during the wear tests.

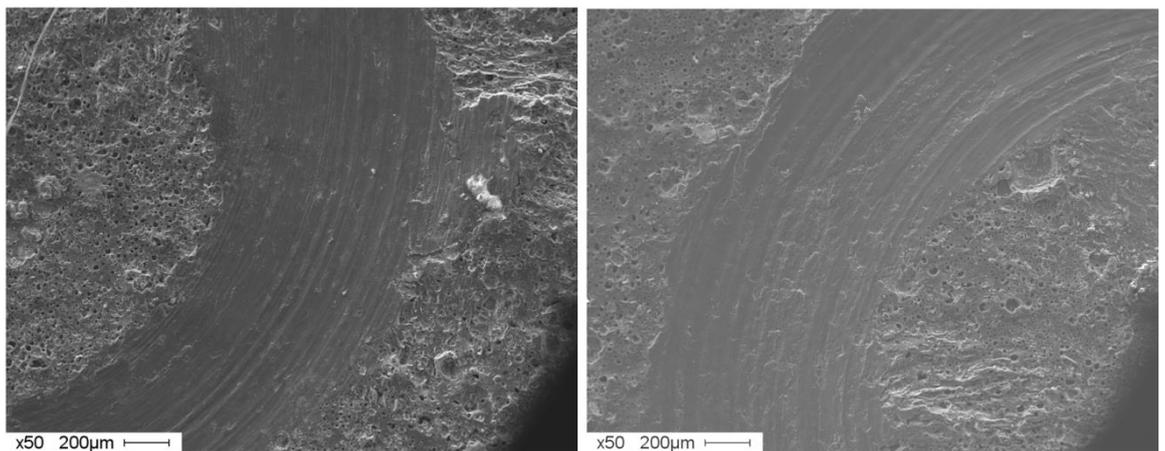


Figure 3.13. The friction paths formed during the tribological tests of silumin, subjected to electrospray doping. Scanning electron microscopy.

Table 3.7 - Results of tribological tests of silumin of a eutectic composition modified by the method of electrical explosive doping

Sample	Coefficient of wear, $10^{-5}$ , $\text{mm}^3 / \text{N} * \text{m}$	Coefficient of friction
Initial	160	0,36
Modified	5,6	0,16

Analysis of the results presented in Table. 3.7, shows that the wear resistance of the test material after electro spray doping has increased, in comparison with the wear resistance of the original silumin, by more than 28 times; The coefficient of friction decreased more than 2 times. The change in the coefficient of friction in the process of testing the material for wear resistance is shown in Fig. 3.14.

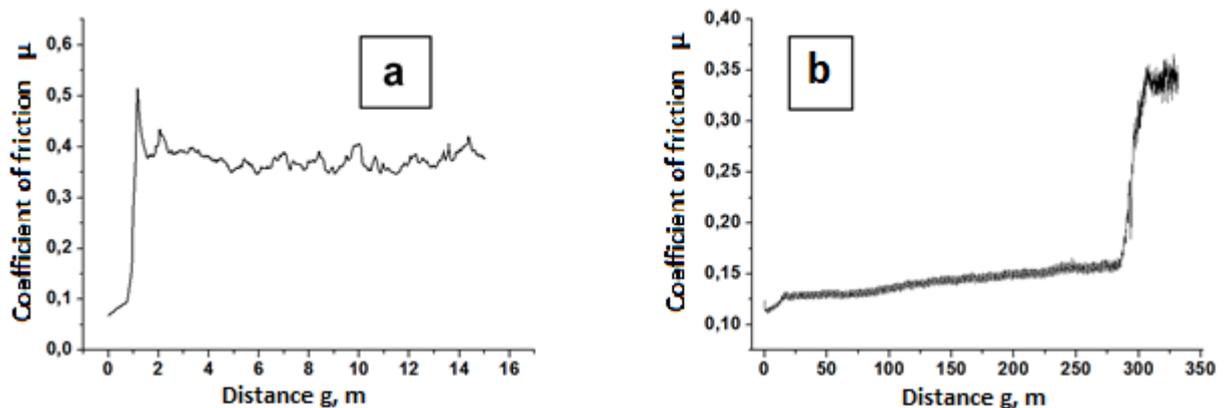


Figure 3.14 - Dependence of the coefficient of friction on the distance traveled by the counterbody along the friction path in the wear test; A - silumin in the cast state; B - silumin after electro spray doping.

Thus, the results presented in this section indicate that the electrically explosive doping of silumin with eutectic composition is accompanied by the formation of a highly porous surface layer with a thickness of up to  $50 \mu\text{m}$ , characterized by inhomogeneity in the distribution of alloying elements (yttrium and oxygen), submicro- and nanoscale multiphase structure, high (Many times

exceeding the values of the silumin of the cast state) by the values of wear resistance and microhardness.

### **3.3 Structure and properties of silumin of eutectic composition subjected to EVL and subsequent irradiation with an intense pulsed electron beam**

In order to eliminate the high level of roughness and porosity of the surface layer of silumin, modified by the electric explosion method, additional processing of the material with an intense pulsed electron beam was carried out. Irradiation regime: the energy of accelerated electrons is 17 keV; The energy density of the electron beam is 40 J / cm<sup>2</sup>; Number of impact pulses 10; Pulse repetition rate 0.3 s<sup>-1</sup>; The duration of the pulses of exposure is 50 μs, 150 μs, 200 μs. Preliminary calculations of the temperature field have shown that at these parameters of the electron beam in the surface layer of the silumin, a temperature exceeding the melting point of all the phases present in the material is reached.

The performed investigations showed that the treatment of the modified silumin surface with an intense pulsed electron beam is accompanied by a radical change in the morphology of the structure of the surface layer of the material. Studies performed by scanning electron microscopy have shown that as a result of irradiation a high-density smooth surface layer is formed, the characteristic image of which is shown in Fig. 3.15. The irradiation surface has submicrocrystalline structures with a crystallite size of  $\approx 500$  μm (Fig. 3.15, b, d, e). Crystallites are grouped in regions with dimensions (2-4) μm, separated by microcracks (Fig. 3.15, b). As the duration of the electron beam pulse increases, the number of microcracks in the surface layer decreases.

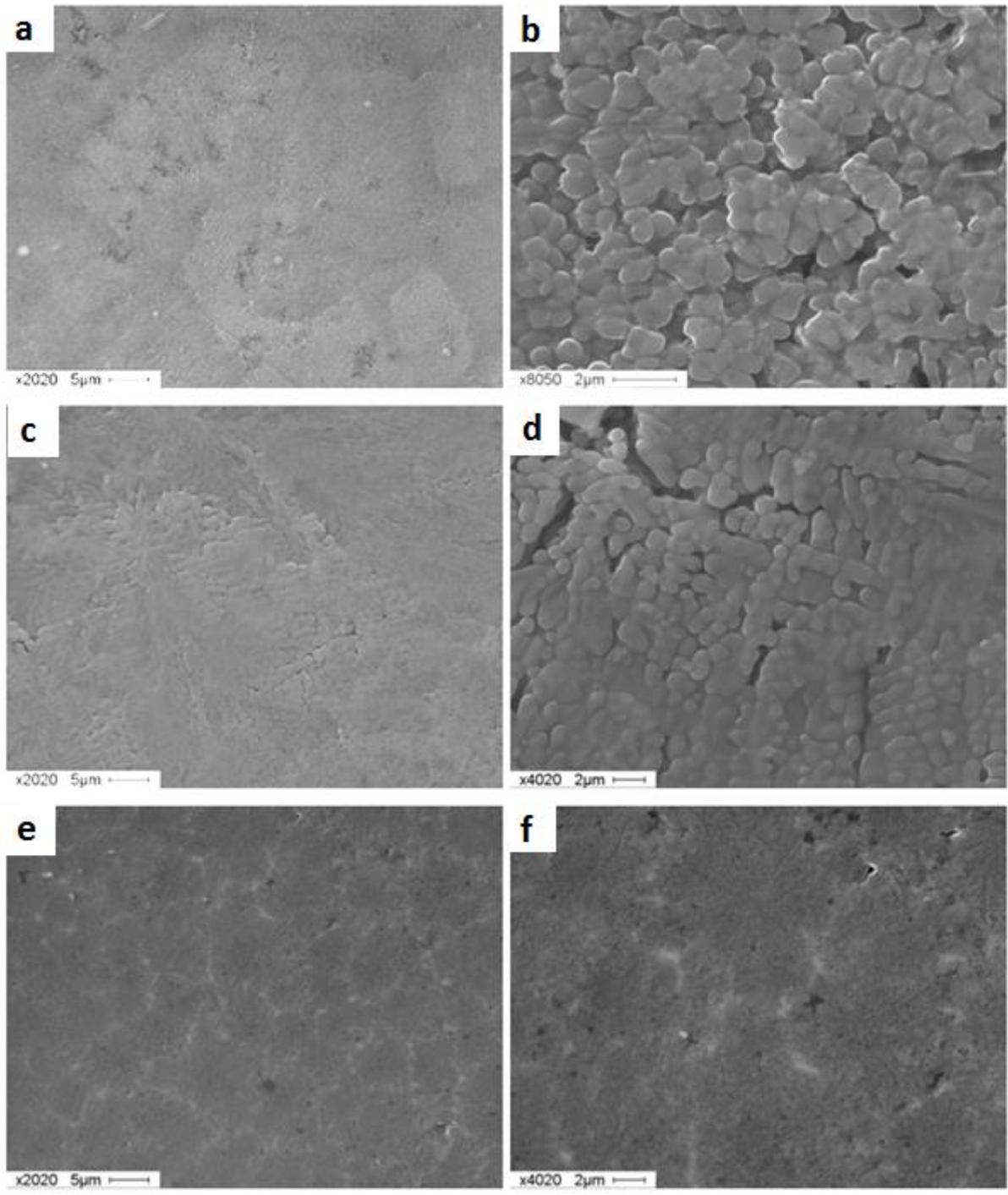


Figure 3.15. Electron-microscopic image of the surface structure of silumin, subjected to electro-spray doping and subsequent irradiation with an intense pulsed electron beam with a pulse duration: a, b - 50  $\mu$ s; c, d - 150  $\mu$ s; e, f - 200 microseconds.

The results of micro-X-ray spectral analysis of the surface layer of silumin, subjected to electro-spray doping and subsequent irradiation with an electron beam, are given in Table. 3.8.

Table 3.8 - Table of the results of micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of silumin, subjected to electrospray doping and subsequent irradiation with an electron beam (wt%, Al - rest). The energy spectra are obtained from the sample section shown in Fig. 3.10, a.

Si	Mg	Cu	Ni	Y	O
50 $\mu$ s					
5,2	0,9	3,8	1,9	7,7	1,5
150 $\mu$ s					
5,3	0,0	2,8	1,4	7,7	3,7
200 $\mu$ s					
9,0	0,0	4,7	2,8	9,8	4,1

Comparing the results presented in Table. 3.8 and Table. 3.4, it can be noted that irradiation of the modified silumin layer with an intense pulsed electron beam leads to an increase in the concentration of silicon and copper in the surface layer and a significant decrease in the concentration of yttrium and oxygen.

The results of the investigation of the phase composition of the surface layer of silumin, subjected to electrospray doping and subsequent irradiation with an intense pulsed electron beam, were performed by X-ray diffraction analysis. The results of the analysis are given in Table. 3.9.

Analyzing the results presented in the table, it can be noted that as the duration of the electron beam pulse increases, the phase composition of the surface layer of the material changes, namely, the relative content of yttrium oxide and silicon decreases. Reduction of the yttrium oxide content can be due to its dissolution in the melt of silumin. The relatively high content of silicon in the surface layer of silumin, irradiated by an electron beam with a pulse duration of 50  $\mu$ s, can be due to the evaporation of aluminum.

The volume structure of silumin, subjected to electrospray doping and subsequent processing by an intense pulsed electron beam, was analyzed by the

cross-section method. A typical image of the structure of a doped layer, revealed by scanning electron microscopy, is shown in Fig. 3.16.

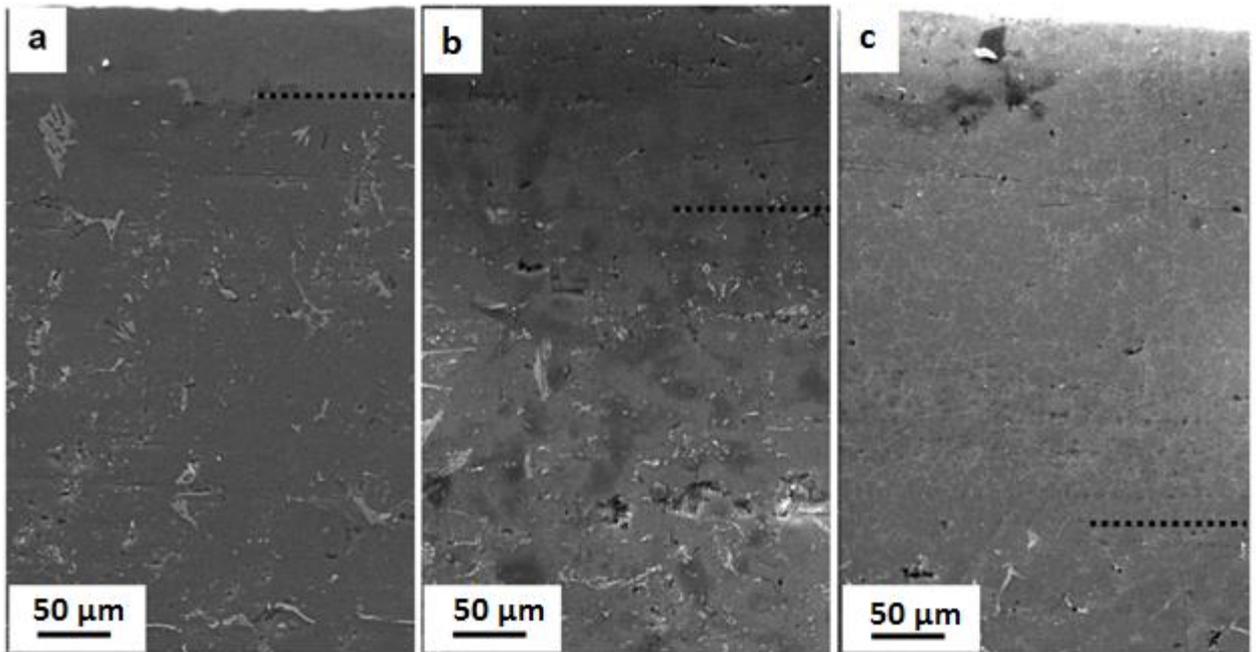


Figure 3.16 - The structure of the transverse Silumin section of a eutectic composition subjected to electrospark doping and subsequent processing by an intense pulsed electron beam with a beam pulse duration: a- 50  $\mu$ s; b - 150  $\mu$ s; c - 200  $\mu$ s. Scanning electron microscopy.

Analyzing the results presented in this figure, it can be noted, firstly, that the thickness of the modified layer depends on the duration of the electron beam pulse and increases from 60  $\mu$ m at a pulse duration of 50  $\mu$ s to 340  $\mu$ m at a pulse duration of 200  $\mu$ s. We note that the thickness of the modified layer during electrospark doping varied within the range (30-50)  $\mu$ m (Figure 3.8). Secondly, a high level of density of the modified layer; The minimum number of pores is revealed when the material is irradiated with an electron beam with a pulse duration of 50  $\mu$ s.

The mechanical properties of the modified silumin layer were characterized by the value of microhardness (load on the indenter 0.5 N). The results of the performed studies are given in Table. 3.9.

Table 3.9 - Results of mechanical and tribological tests of silumin of a eutectic composition modified by the method of electric explosive doping and additionally irradiated with an intense pulsed electron beam

№	AlSi + EVL (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + NSEP	HV*, kg/mm <sup>2</sup> , 0,5 N	HV**, kg/mm <sup>2</sup> , 0,2 N	Coefficient of friction, μ	Coefficient of wear, 10 <sup>-4</sup> , mm <sup>3</sup> /N * m,
	Initial AlSi	70		0,36	16,0
	AlSi+ EVL (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )			0,16	0,56
1	40 J / cm <sup>2</sup> , 50 μs, 10 pulses.	130	170	0,43	4,2
2	40 J / cm <sup>2</sup> , 150 μs, 10 pulses	140	150	0,47	3,1
3	40 J / cm <sup>2</sup> , 200 μs, 10 pulses	103	115	0,49	1,1

Note: HV \* - the load on the indenter is 0.5 N; HV \*\* - load on indenter 0.2N

Analyzing the results presented in Table. 3.9, it can be noted that the microhardness of the modified surface layer is almost 2 times higher than the microhardness of the cast silumin. As the electron beam pulse duration increases, the microhardness of the surface modified layer decreases.

The microhardness of the modified bulk layer was determined on cross sections. The results of the study are shown in Fig. 3.17. Analyzing the data presented in Fig. 3.17 results, you can identify the following patterns. First, the microhardness of silumin in the volume of the modified layer varies insignificantly. Secondly, as the duration of the electron beam pulse increases, the microhardness of the modified layer decreases. Third, the thickness of the surface layer with a high microhardness corresponds (regardless of the irradiation regime of the material by the pulsed electron beam) to the thickness of the layer revealed by scanning electron microscopy when studying the structure of transverse sections.

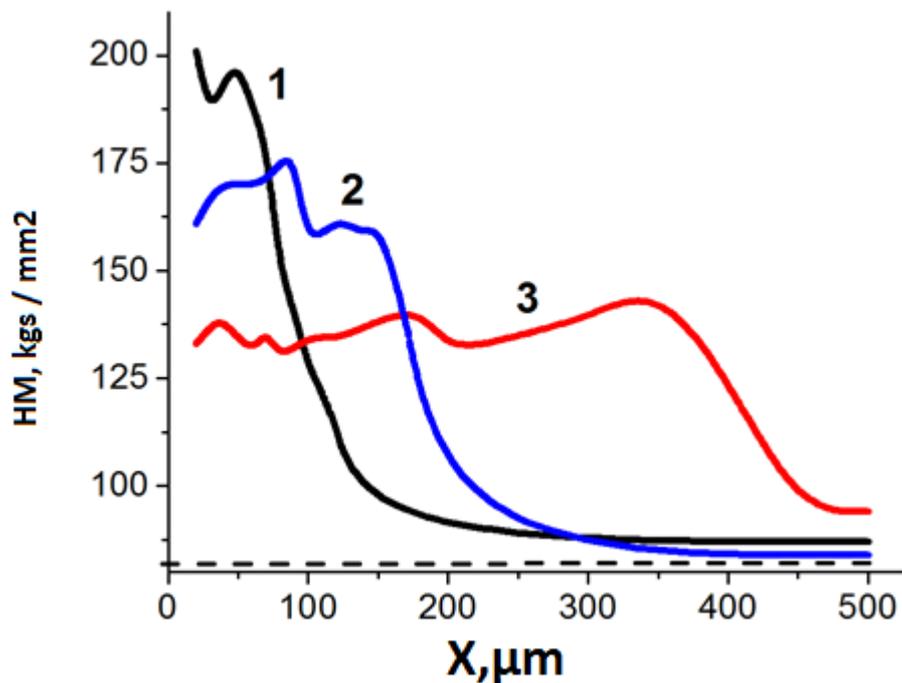


Figure 3.17 - Profile of microhardness of the surface layer of silumin, subjected to electrospray doping and subsequent processing by an intense pulsed electron beam with parameters: curve 1 - 40 J / cm<sup>2</sup>; 50 μs; 10 pulses; Curve 2 - 40 J / cm<sup>2</sup>; 150 μs; 10 pulses; Curve 3 - 40 J / cm<sup>2</sup>; 200 μs; 10 pulses.

The results of tribological tests of silumin of a eutectic composition subjected to electrospray doping and subsequent irradiation with an intense pulsed electron beam are given in Table. 3.9. It can be clearly seen that the treatment of the modified layer with an electron beam leads to a decrease in the wear resistance of the material by a factor of 2 to 7.5. The increase in the duration of the electron beam pulse is accompanied by an increase in the wear resistance of the material, at best (for a pulse duration of the electron beam of 200 μs), exceeding the wear resistance of the cast silumin by ≈16 times.

## Приложение Б Литейные и другие технологические свойства эвтектических силуминов

(рекомендуемое)

Сплав	Текучесть	Горячее растрески- вание	Герме- тичность	Качество поверхност и	Способ- ность к состарива- нию	Коррозион- ная стойкость	Декорат- тивное анодиро- вание	Свариваем ость	Полируе- мость
Silumin	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AlSi12(a)	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AlSi12(b)	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AlSi12(Fe)(a)	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AlSi12(Fe)(b)	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AlSi12(Cu)	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AlSi12Cu1(Fe)	■	■	■	■	■	■	■	■	■

## Приложение В Физические свойства эвтектических силуминов

(рекомендуемое)

Сплав	Плотность	Модуль упругости	Теплоемкость	Температура затвердевания	Коэффициент линейного расширения	Электро- проводимость	Тепло- проводность
	г/см <sup>3</sup>	МПа	Дж/г*К	°С	10 <sup>-6</sup> /К 293 К – 373 К	МС/м	Вт/(мК)
AlSi12(a)	2,68	75,000	0,90	~ 577	20	17 - 24	140 - 170
AlSi12(b)					20	16 - 23	130 - 160
AlSi12(Fe)(a)	2,68	75,000	0,90	~ 577	20	16 - 22	130 - 160
AlSi12(Fe)(b)					20	16 - 22	130 - 160
AlSi12(Cu)	2,70	75,000	0,89	~ 577	20	16 - 22	130 - 150
AlSi12Cu1(Fe)	2,70	75,000	0,89	~ 577	20	15 - 20	120 - 150

## Приложение Г Механические свойства эвтектических силуминов

(рекомендуемое)

Сплав	Состояние	Метод литья	Предел прочности, Мпа	Предел текучести 0,2 МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, НВ	Усталостная прочность, МПа
			не менее	не менее	не менее	не менее	
AlSi12(a)	F	Литье в песчаные формы	150	70	5	50	60 - 90
AlSi12(b)	F		150	70	4	50	60 - 90
AlSi12(Cu)	F		150	80	1	50	60 - 90
AlSi12(a)	F	Литье в кокиль	170	80	6	55	60 - 90
AlSi12(Cu)	F		170	90	2	55	60 - 90
AlSi12(Fe)(a)	F	Литье под давлением	240	130	1	60	60 - 90
AlSi12(Fe)(b)	F		240	140	1	60	60 - 90
AlSi12Cu1(Fe)	F		240	140	1	70	60 - 90

**Приложение Д Типичные технологические параметры литья эвтектических силуминов**  
(рекомендуемое)

Сплав	Температура литья			Допустимая усадка		
	Литье в песчаные формы	Литье в кокиль	Литье под давлением	Литье в песчаные формы	Литье в кокиль	Литье под давлением
	°С	°С	°С	%	%	%
AlSi12(a)	670 – 740	670 – 740		1,0 – 1,2	0,5 – 0,8	
AlSi12(Fe)(a)			620 - 660			0,4 – 0,6
AlSi12(Cu)	670 - 740	670 – 740		1,0 – 1,2	0,5 – 0,8	
AlSi12Cu1(Fe)			620 - 660			0,4 – 0,6

