

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 Наноматериалов и нанотехнологий

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка методов модификации структуры и свойств силумина заэвтектического состава

УДК 669/713-048/25

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Рыгина Мария Евгеньевна		

Руководитель

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

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.

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 Наноматериалов и нанотехнологий

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	Рыгина Мария Евгеньевна

Тема работы:

Разработка методов модификации структуры и свойств силумина заэвтектического состава

Утверждена приказом директора ИФВТ

Приказ № _____ от _____

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования данной работы является заэвтектический силумин Al-(22-24 вес. %) Si. Данный материал подвергался облучению электронным пучком, ионно-плазменному напылению покрытия ZrTiCu с последующим электронным плавлением. Основными требованиями к материалу является твердость и износостойкость.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Изучить литературу по темам: силумины, заэвтектические силумины, ионно-электронно-плазменная обработка, нанесение покрытий, формирование поверхностного сплава. Модифицировать образцы заэвтектического силумина. Исследовать элементный и фазовый состав, структуру, механические и трибологические характеристики модифицированных образцов.

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>
--

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>О.С. Квашина, старший преподаватель, каф. ин. языков физико-технического института, НИ ТПУ</i>

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

<i>Результаты исследования и их обсуждение</i>

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Рыгина Мария Евгеньевна		

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
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

Оглавление

Реферат	7
Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки.....	9
Введение.....	11
1. Обзор литературы	14
1.1. Силумин	14
1.2. Алюминий-кремний, силумины и их характеристика	15
1.3. Роль кремния в силумине.....	21
1.4. Легирующие элементы и примеси, влияние добавок на структуру заэвтектических силуминов	22
1.5. Металлическое стекло	24
1.6. Литье силуминов и роль наследственности	26
1.7. Методы модификации структуры и свойств алюминия и сплавов на его основе.....	28
1.7.1 Традиционные методы	28
1.7.2 Методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии	32
2. Материал, методы обработки и методы исследования.....	37
2.1 Формирование системы пленка/подложка	41
2.2 Формирование поверхностного сплава	42
3. Результаты исследования и их обсуждение.....	45
3.1 Структура заэвтектического силумин в исходном состоянии	45
3.2 Структура заэвтектического силумина, обработанного интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО»	48
3.3 Формирование системы «пленка (Zr-Ti-Cu)/(Al-Si) подложка»	52
3.4 Формирование поверхностного сплава при облучении системы «пленка (Zr-Ti-Cu)/(Al-Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО»	55
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	61

5. Социальная ответственность	74
Заключение	93
Список публикаций.....	95
Список используемых источников.....	98
Приложение A Results of the research and their discussion	105

РЕФЕРАТ

Диссертация на соискание степени магистра 119 с., 45 рис., 26 табл., 70 источников.

Ключевые слова: ионно-электронно-плазменная обработка, первичные зерна, эвтектика, заэвтектический силумин, система «пленка/подложка», поверхностный слой, фазовый состав, структура, свойства.

Объектом исследования является заэвтектический силумин, подвергнутый модифицированию ионно-электронно-плазменными методами.

Цель работы – разработка ионно-электронно-плазменного метода модифицирования структуры и свойств заэвтектического силумина.

Изучение фазового и элементного состава, исследование дефектной структуры поверхности модифицирования методами оптической (NEOFOT-32), сканирующей (SEM-515 Philips) и просвечивающей (JEM 2100F JEOL) электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000, съемка осуществлялась в медном отфильтрованном излучении Cu-K α 1; монохроматор CM-3121). Прочностные свойства материала характеризовали микротвердостью (прибор ПМТ-3, нагрузка на индентор 0,1 Н). Исследования скорости износа системы образцов силумина проводили в геометрии диск-штифт с помощью трибометра TRIBOtechnic.

В результате исследования выявлены оптимальные режимы обработки образцов, позволяющие вкратно повысить механических и трибологические характеристики силумина.

Модифицированные материалы отличаются высоким уровнем дисперсности и однородности структуры, высокими значениями твердости и износостойкости по сравнению с исходными образцами.

На данном этапе работы степень внедрения не очевидна.

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

Экономическая эффективность и менеджмент показали, что итоговые затраты на выполненные исследования составят 184,75 тысяч рублей.

Объемы отчислений в страховые, пенсионные и медицинские учреждения составляют около 10 % от всех затрат.

В дальнейшем планируется продолжить поиски режимов комбинированной ионно-электронно-плазменной обработки силумина заэвтектического состава, позволяющих многократно повысить прочностные и трибологические свойства материала.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Концентрированные потоки энергии – 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.

Нанокристаллические материалы (нанокристаллическая структура) – кристаллические материалы (структуры) со средним размером зерен или других структурных единиц менее 100 нм.

Субмикрокристаллические материалы (субмикрокристаллическая структура) – кристаллические материалы (структуры) со средним размером зерен или других структурных единиц от 100 до 500 нм.

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 – видоизменение, преобразование структуры, способствующее появлению новых свойств материала.

Легирование – процесс введения в состав материала определенных элементов. Применяется легирование для изменения или улучшения физических и химических свойств металлов, сплавов.

Алюминий – элемент 13-й группы периодической таблицы химических элементов (по устаревшей классификации — элемент главной подгруппы III группы), третьего периода с атомным номером 13.

Кремний - элемент четырнадцатой группы (по старой классификации — главной подгруппы четвёртой группы), третьего периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева с атомным номером 14.

Силумин – сплав алюминия с кремнием.

Эвтектика - инвариантная (при постоянном давлении) точка в системе из n компонентов, в которой находятся в равновесии n твердых фаз и жидкая фаза. Эвтектическая композиция представляет собой жидкий раствор, кристаллизующийся при наиболее низкой температуре для сплавов данной системы.

Микротвердость – твердость отдельных фаз и структурных составляющих, твердость отдельных участков зерен. Способность материала не испытывать пластической деформации вследствие местного воздействия на микроуровне.

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

Коэффициент трения – процесс взаимодействия тел при их относительном движении либо при движении тела в газообразной или жидкой среде.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении все более необходимы материалы с повышенными прочностными, эксплуатационными характеристиками. Очевидно, что чем более сложная конструкция, в которой используется материал, тем выше требования по ресурсоэффективности, прочностным и трибологическим свойствам, экономическим показателям. В большинстве случаев при эксплуатации детали и механизмов первыми на нагрузку принимают поверхностные слои материала, именно они привлекают наибольшее внимание ученых и специалистов-практиков. При недостаточных эксплуатационных характеристиках поверхности использование материала не оправдано.

Алюминий – легкий, коррозионностойкий и относительно дешевый материал для использования в массовом производстве. Основным недостатком алюминия – низкие прочностные и трибологические свойства. Наиболее популярным методом устранения этого недостатка является легирование алюминия, т.е. формирование сплавов на основе алюминия.

Силумины – литейный сплав алюминия и кремния. В отличие от чистого алюминия, силумин, за счет присутствия кремния, обладает повышенной прочностью и твердостью, износостойкостью и т.д. Твердость данного сплава напрямую зависит от концентрации в нем кремния. Этим объясняется идея разработки и использования заэвтектического силумина, т.е. силумина, концентрация кремния в котором превышает 12 вес.%. Однако при наличии такого количества кремния силумин обладает пониженными литейными свойствами, слитки характеризуются наличием крупных включений кремния, пор, трещин и т.д., что снижает эксплуатационные свойства материала.

Перспективным методом устранения указанных литейных недостатков заэвтектических силуминов является обработка поверхности изделия интенсивным импульсным электронным пучком, позволяющая осуществлять высокоскоростное плавление и высокоскоростную

кристаллизацию поверхностного слоя материала. Комбинированная электронно-ионно-плазменная обработка, сочетающая нанесение пленок различного элементного состава и последующее облучение электронным пучком, позволяет не только осуществить термическое воздействие на поверхность материала, но и выполнить легирование поверхностного слоя. В совокупности указанные методы воздействия на структуру и фазовый состав позволяют минимизировать большую часть недостатков и сделать возможным использование заэвтектических силуминов в реальном производстве.

Цель работы – разработка метода комбинированного электронно-ионно-плазменного модифицирования структуры и свойств поверхностного слоя заэвтектического силумина, сочетающего нанесение тонкой пленки и последующее облучение системы «пленка/подложка» высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Новизна работы обусловлена тем, что используемые в работе установки для электронно-ионно-плазменной модификации по совокупности параметров являются уникальными.

Результаты исследований могут быть применены в высокотехнологичных областях, где требуются повышенные характеристики материалов. В частности, где свойства деталей машин и механизмов обеспечиваются состоянием ее поверхностного слоя. К таким областям относятся авиакосмическая промышленность, машиностроение, судостроение.

Результаты, полученные в работе, были представлены: на V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов "Высокие технологии в современной науке и технике", (г. Томск, 2016), на III Международной научной конференции студентов и молодых ученых "Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы" (г. Томск, 2016), и других конференциях различного уровня.

Результаты выполненных исследований были оценены 5 дипломами за доклады на конференциях международного уровня. Наиболее значимые из них: диплом I степени на III Международной научной конференции студентов и молодых ученых "Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы", Томск, 22-25 ноября 2016 г.; диплом II степени на IX Международной научно-практической конференции "Современные проблемы машиностроения", Томск, 1-4 декабря 2015г.; диплом имени Ю.А. Гагарина финалисту 1-ого открытого конкурса на получение стипендии имени Ю.А. Гагарина, 2016 г.

По результатам проведенных научных исследований опубликовано 27 работ, из них 8 работ опубликованы в научных периодических изданиях, индексируемой международными базами данных Web of Science и Scopus, 1 работа опубликована в журнале, аккредитованном Высшей Аттестационной Комиссией (Известия высших учебных заведений. Физика). В печать направлена 1 статья в Key Engineering Materials.

На данном этапе исследований внедрение результатов работы не очевидно.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. СИЛУМИН

Силумин – сплав алюминия с кремнием. Химический состав: основа – Al, легирующий элемент – Si (4-22 %), примеси: Fe, Mg, Cu, Mn, Ca, Ti, Zn и некоторые другие. Возможно содержание натрия и лития. Добавка всего 0,05 % лития или 0,1 % натрия позволяет увеличить содержание кремния в эвтектическом сплаве до 14 %. Основная особенность силуминов – хорошие литейные свойства. В двойных сплавах Al-Si эвтектика состоит из твердого раствора на основе алюминия и кристаллов практически чистого кремния. При легировании силуминов возможно наличие двойных и тройных эвтектик. В двойных силуминах с увеличением содержания кремния до эвтектического состава снижается пластичность и повышается прочность [1].

Силумины занимают ведущие позиции во многих отраслях промышленности несмотря на значительный прогресс материаловедения в области создания новых сплавов и композитов, превосходящих силумины по свойствам [2]. Это связано с их относительно низкой стоимостью, относительно низким удельным весом и, следовательно, относительно высокими удельными свойствами. Основной недостаток силуминов – сравнительно низкие прочностные свойства, что существенно сужает сферу их применения. Существует множество традиционных способов решения данной проблемы. Например, свойства силуминов могут быть существенно улучшены при правильном выборе технологии обработки расплава, термической обработке материала и разработке оптимального состава сплава [3, 4].

1.2. АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ. СИЛУМИНЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

В литейных сплавах, основанных на алюминии, система алюминий-кремний является основной. Эвтектический тип диаграммы состояния обусловлен равновесным твердым раствором кремния в алюминии

В соответствии с диаграммой в равновесии могут находиться эвтектические, доэвтектические и заэвтектические растворы [5]. Все они отличаются разными режимами приготовления сплавов.

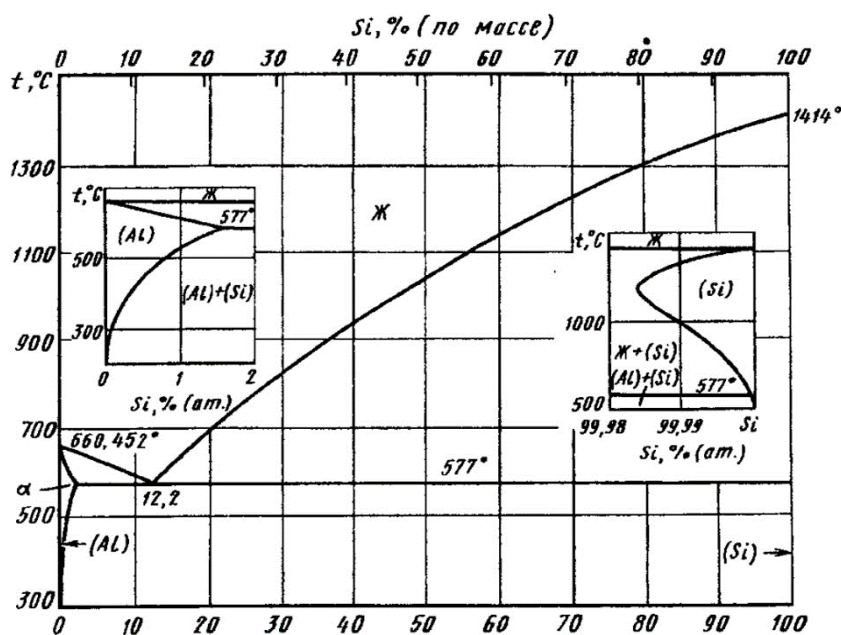


Рисунок 1.1- Диаграмма состояния Al-Si [5]

Согласно диаграмме (рисунок 1.1) в доэвтектических силуминах концентрация кремния не превышает 9%, а структура их состоит из участков α-твердого раствора на основе алюминия, между которыми располагается эвтектика α+Si. Эвтектические сплавы содержат (9–13) % Si, а структура их, кроме эвтектики, может включать дендриты α-твердого раствора и небольшое количество первичных кристаллов кремния. Типичным силумином эвтектического состава является сплав АЛ2 (АК12) с содержанием (10-13) % Si. В литом состоянии он состоит в основном из эвтектики и некоторого количество избыточных кристаллов кремния.

Сплавы, содержащие более 13 % Si и состоящие из первичных кристаллов кремния, интерметаллидов и эвтектики относятся к заэвтектическим [5]. Эти сплавы обычно имеют грубую игольчатую структуру, состоящую из эвтектики (α -Si) и первичных кристаллов кремния.

Жидкая фаза сплава Al-Si состоит из раствора кремния в алюминии; кремний может находиться в ковалентном состоянии, а также в металлическом состоянии. Именно наличие донорно-акцепторного взаимодействия между атомами алюминия и кремния объясняется образованием кластеров. Электронная плотность затрудняет дальнейшее размещение атомов кремния, в связи с этим атомы выталкиваются на поверхность и образуют первичные зерна кремния.

Силумин, имеющий в своей структуре первичные зерна кремния, имеет низкие механические свойства: $\sigma_{\text{в}} = (120 - 160)$ МПа при относительном удлинении $\delta < 1\%$. Но хорошая жидкотекучесть, свариваемость, которые не всегда удается достичь в других сплавах, открывают перспективы его использования. Силумины не склонны к образованию трещин при литье. Так как значение растворимости кремния не зависит, в значительной степени, от температуры, а соответственно нет возможности производить термическую обработку-ковку, закалку, то единственным вариантом повышения характеристик остается модифицирование. Возможность модифицирования солями натрия и натрием позволяет измельчить частицы заэвтектической смеси, это связано со способностью натрия обволакивать образовавшиеся зародыши кремния.

Механические свойства сплавов Al-Si существенным образом зависят от содержания кремния. Значение электродного потенциала составляет 0,26 В. Сплав Al - 1% Si имеет потенциал 0,81 В при том, что потенциале алюминия - 0,85 В. Соответственно большая разница между потенциалами данных фаз должно приводить к быстрым коррозионным процессам. Но в большинстве сред кремний проявляет инертность, из-за чего сопротивление коррозии аналогично алюминию.

Кремний не склонен оказывать влияние на кристаллизацию алюминия, но изменяет горячеломкость при сварке. Горячеломкость максимальна при пределе растворимости в твердом состоянии между солидусом и ликвидусом. Затем она снижается до минимального значения при значениях содержания кремния около 12 вес. %

Благодаря сфероидизации и коагуляцией кремния выше 427 °С сплавы сверхпластичны. В процессе распада твердого раствора наблюдается достижение максимального значения для внутреннего трения. Коррозионная стойкость зависит от многих факторов, чем выше твердость, тем ниже сопротивление коррозии, а в свежезакаленном состоянии достигает максимума. Величина энергии активации диффузии, равная, 1,3 эВ.

Кремний оказывает влияние на скорость охлаждения при закалке, чем выше содержание кремния, тем быстрее происходит закалка, и выше искажения кристаллической решетки.

Силумины обладают средней коррозионной стойкостью, они могут эксплуатироваться в промышленной атмосфере без защиты или с защитой поверхности с помощью окрашивания. Стойкость в воде зависит во многом от наличия различных примесей и легирующих элементов.

При переходе от эвтектических к заэвтектическим силуминам, скорость окисления растет [6].

В то время как эвтектические и доэвтектические силумины уже достаточно полно изучены, особый интерес представляют заэвтектические силумины с содержанием кремния, превышающим 12 %. Работы по повышению прочностных характеристик заэвтектических силуминов, придания структуре равномерного распределения кремния, ведутся в настоящее время интенсивно. В таблице 1.1 представлены наиболее значимые исследования по модификации силуминов за рубежом.

Таблица 1.1 – Основные работы, ведущиеся по теме магистерской диссертации за рубежом [7-17]

	Сплав	Легирующий элемент	Метод	Результат
Польша, Германия, Боровски, Бартковиак	Al-Si6- Cu4	-	Лазерное облучение	1200 НВ 1600 НВ Коэфф. тр 0.05
США, Раджамур, Гупта и др.	Алюмин ий	Мо	Лазерное облучение	5000 МПа Износ 0.0015 мг
Китай, Лиинг Ц, Юнджинг Д. и др	Al-8.5Fe- 1.3V- 1.7Si	-	Лазерная плавка	1600 НВ
Китай, Циан Дж., Ли Т. И др.	Al-Si	Al₂O₃	Напыление с помощью лазерной плазмы	4600 НВ (50 мкм)
Индия, Паракаш С., и др.	Al	Rock dust particles: SiC, Al₂O₃ и B₄C	Анодирование	620 НВ 70 мм ³ /м
Украина, Мордюк Б.Н., Прокопенко Г.И. и др.	Al-6Mg	Al ₆₃ Cu ₂₅ Fe ₁₂ Квазикристал лы	Ультразвуковое воздействие	Микротвердость 2250 МПа, Тв-1910 МПа износ (10 мкм)
Япония, Уеяма Д., Сайтох Ю. и др	Al-Mg-Si		Ионное облучение (от разных металлов) + терм. старение	Твердость 1230 МПа Толщина (16.5 мкм)
Германия, Нехкорн С., Хендел М. и др	Al-Cu	Al ₂ O ₃ и SiC	Анодирование для создания пленки	700-2100 МПа
Канада, Фаркуш А.Р., Гранд Чен., и др	Al-7Si- 0,5Cu- 0,3Mg	Мо	Легирование и закалка	около 1355 НВ
Индия, Гопи В., и др	Al-Cu		Рафинирование с помощью газового вольфрамового катода	1050 НВ 1,4 мм ³ /м

Как видно из представленных в таблице 1.1 результатов работ [7-17], область модификации легких сплавов остается востребованной и в настоящее время.

Как было сказано выше, заэвтектические силумины обладают существенно неоднородной структурой. В настоящее время в России и за рубежом проводятся исследования, направленные на модифицирование структуры и улучшение свойств данных сплавов.

Таблица 1.2 – Работы, выполненные в России и за рубежом [18-22]

	Исходник	Легирующий элемент	Метод	Результат
Комаров А.И и др.	АК12М2	AlN, AlB ₂ В наносостоянии	Легирующие поверхности	Интенсивность износа 0.11 мг/м
Федотов М.В., Федотов В.М., СГИУ	Заэвтектические силумины различного состава	Бор	Литье	Измельчение зерна первичного кремния
Гарибян Г.С., Расщупкин В.П. ОГТУ	Заэвтектические силумины	Фосфиды	Плавка в электропечи	Твердость 1020-2000 НВ
Чибирнова Ю.В., Изотов В.А. РГАТУ	Силумины разных составов	Углерод (0.05-0.5%)	Легирующие	Уменьшение размеров дендритов
Комаров А.И. Минск	Эвтектический силумин	Оксид титана	Микродуговое оксидирование	Увеличение твердости в 1.7 раза, износостойкость в 3 раза, коэфф. тр. в 1,2 раза
Богданова Т.А. и др	Силумин	Флюс COVERAL MTS1582	Внепечное рафинирование	Измельчение зерна в 2-4 раза

В таблице 1.2 приведены основные работы, ведущиеся в этом направлении. Можно выделить основные методы, такие как легирование и рафинирование, так же применяют метод переотливки, что приводит к измельчению зерна.

Исходя из результатов, представленных в работах [7-22], силумины вызывают огромный интерес как новый материал. Соответственно его можно считать перспективным в авиа- и космостроении, машиностроении и судостроении.

1.3. РОЛЬ КРЕМНИЯ В СИЛУМИНЕ

Примеси, присутствующие в алюминии, понижают его пластичность, электро- и теплопроводность. Присутствие примесей часто приводит к нарушению защитного действия оксидной пленки алюминия. Обычно примеси в технически чистом алюминии бывают следующими.

Примеси железа и его соединений очень мало растворимы в алюминии, и уже при тысячных долях процента при низких температурах появляется новая фаза FeAl_3 . Из-за наличия таких примесей проявляется наследственность и устойчивость литой структуры. Железо уменьшает электропроводность и химическую стойкость алюминия. Дендритное строение сохраняется даже при больших степенях деформации. Так же из-за наличия данной примеси уменьшается электропроводность и химическая стойкость алюминия.

Кремний в алюминии вместе с атомами железа образует эвтектику из твердого раствора на основе алюминия и кристаллов FeSiAl_5 , которая имеет форму китайских иероглифов. Введение хрома в состав сплава позволяет нейтрализовать вредное влияние железа, для той же цели вводится марганец, который образует соединение $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$, которое кристаллизуется первично в виде ограненных кристаллов и повышает пластичность материала.

Кремний является основным легирующим элементом алюминия, он придает высокую текучесть и низкую усадку материалу, в результате у сплавов системы Al–Si хорошие литейные свойства и хорошая свариваемость.

Кремний основной легирующий элемент для алюминия в составе силуминов. Силумины обычно содержат от 5 вес. % до 14 вес. % Si, т.е. около эвтектического состояния [23].

1.4. ЛЕГИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПРИМЕСИ, ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ

Силумины обладают весьма неоднородной структурой. Для преодоления этого недостатка используют легирующие элементы, позволяющие минимизировать уровень неоднородности.

Одним из самых используемых легирующих элементов является магний, так как именно он образует интерметаллиды с достаточно большой скоростью. При отжиге под закалку интерметаллид Mg_2Si растворяется, образующие его элементы диффундируют в твёрдый раствор, а при последующем старении выделяются в мелкодисперсной форме.

Так же традиционно используется фосфор, который можно вводить в расплав в виде лигатуры (Cu-P). Продолжительность усвоения 30-60 минут, перегрев расплава составляет $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24, 25].

Для повышения жаростойкости используют в качестве легирующего элемента медь. Медь вводят в расплав в виде лигатуры Al+50% Cu. При этом, для тройных сплавов положительные эффекты значительно ниже, чем для двойных. Этот эффект тем хуже, чем выше содержание в силумине кремния. Отрицательное влияние железа не проявляется при содержании в сплаве меди, если содержание железа меньше 0,25%.

Положительное действие на заэвтектический силумин оказывают иттрий и церий, но их взаимодействие с фосфором требует дальнейшего изучения.

Цинк вводится для повышения прочности, марганец повышает жаростойкость. Кобальт повышает электросопротивление. Титан, бор и цирконий оказывают положительное влияние на кинетику распада твердого раствора.

Пористость и плохая жидкотекучесть связаны с наличием присадок натрия, который влияет и на газонасыщаемость силумина [26, 27].

В силуминах могут присутствовать водород и кислород, метан и азот. Предполагается, что водород может образоваться в силуминах при взаимодействии водяного пара, адсорбированного на внешней и внутренней поверхности кристаллов при температуре выше 500 °С. Наличие кремния в расплаве повышает адсорбционную способность сплава. Соответственно заэвтектические силумины характеризуются наличием пор, раковин. Разработан метод минимизации содержания газов в силумине. В его основе лежит выдержка при температуре выше 500 °С в течение длительного времени, при этом в центральной части слитка образуется зона с большим содержанием алюминия, а по краям слитка зона с большим содержанием кремния [28-30].

1.5. МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ СТЕКЛО

Проблема повышения прочности материалов, в частности металлов, остаётся актуальной. Наряду с устоявшимися методами, применяемыми в производстве, разрабатываются и апробируются новые. Классическим подходом к повышению прочности металлов является термическая обработка, приводящая к уменьшению размера зерна и как следствие повышению прочности. Конечно, не последнее место занимает и межзеренная граница, которая при уменьшении размера зерна играет все более значительную роль и по количеству атомов может быть равна атомам, находящимся в объеме зерна.

Другой подход предусматривает выращивание идеального монокристалла, но на данный момент этот способ не применяется к объемным материалам, так как экономически не обоснован.

Металлическое стекло – аморфный металл, который не содержит границ зерен, и зерен вообще, а, следовательно, не содержит линейных и объемных дефектов. Исследования в данном направлении проводятся достаточно давно и начаты еще в 30-е годы прошлого века. Аморфные сплавы изготавливаются закалкой из расплава при высоких скоростях охлаждения порядка 10^6 К/с для того, чтобы затормозить процесс возникновения центров кристаллизации. Структура таких сплавов хаотична и близка к жидкостной.

В настоящее время выделено две группы сплавов, которые проявляют способность к аморфизации. Первая группа вида $T^2_{1-y}X_y$, где T^2 - Mn, Fe, Co, Ni; X - B, C, Si. Вторая группа: $T^1_{1-y}T^2_y$, где T^2 - Fe, Co, Ni; T^1 - Ti, V и др. В данной группе можно выделить ряд подгрупп, они отличаются строгостью состава, приводящего к аморфизации материала.

Важную роль играет процесс стеклования, который происходит в узком интервале температур. Температура стеклования обычно определяется как точка перегиба на кривые повышения теплоемкости. Эта температура не является константой и зависит от условий эксперимента.

Касательно стабильности данное состояние относится к метастабильным, поэтому для перехода в стабильное состояние необходимо повысить температуру и тем самым ускорить диффузионные процессы. Данные манипуляции приведут к переходу материала в кристаллическое состояние.

Сплав Zr-Ti-Cu может быть отнесен к стеклообразным сплавам, так как состоит из ранних переходных элементов и поздних. Максимальная толщина созданного стека из данного сплава составляет 4 мм. Формирование металлического стекла происходит около точки эвтектики, в последнее время количество выявленных эвтектических точек сравнительно велико (рисунок 1.2) [31].

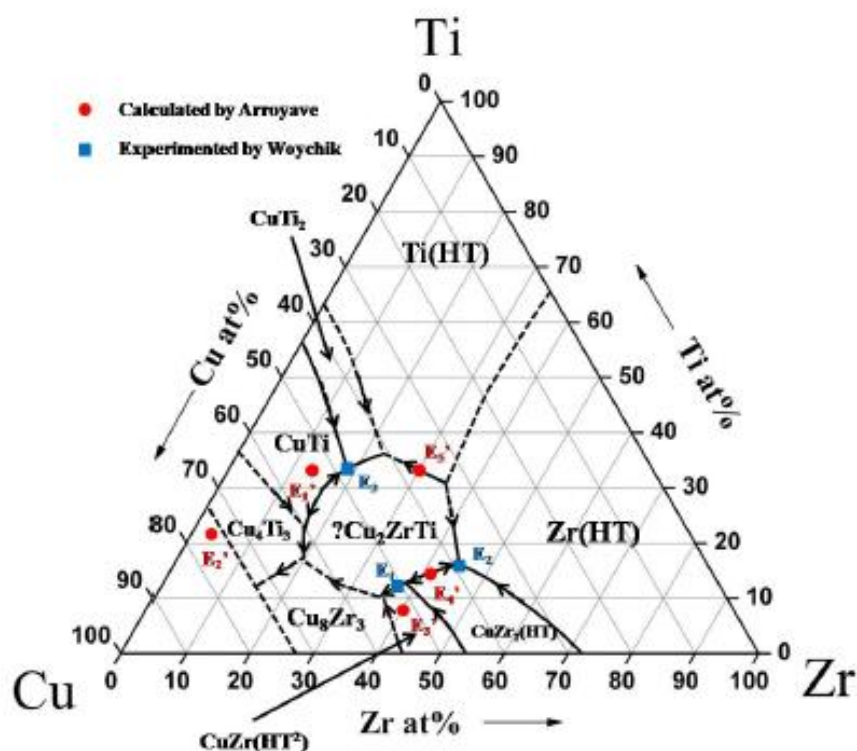


Рисунок 1.2 – Жидкостная проекция тройной фазовой диаграммы системы Cu-Zr-Ti. Три эвтектические точки, отмеченные синим квадратом, были выявлены Войчикум [31]; пять эвтектических точек, отмеченных красными кружками, были выявлены Арройавом [32] (адаптировано из [33])

1.6 ЛИТЬЕ СИЛУМИНОВ И РОЛЬ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

Огромную роль при изготовлении изделий и отливок из силуминов, согласно последним исследованиям, проводимым в Самарском государственном университете [34], играет наследственность. Эксперименты выполняли на силумине заэвтектического состава, содержание кремния в отливках до переплава 20 вес.%. Полученные результаты дают возможность полагать, что существуют определённые закономерности микроструктуры литейных алюминиевых сплавов (силуминов), зная которые, можно управлять процессом формирования микроструктуры будущей отливки. Управляя микроструктурой металлической заготовки, становится легче формировать и предсказывать её эксплуатационные и технологические свойства, влияя на дальнейшую обработку отливки и на эксплуатацию готового изделия [34]. В дальнейших научных изысканиях была выявлена математическая зависимость, демонстрирующая взаимосвязь среднего размера частиц кремния до и после переплавки.

$$K = 1 - \left| \frac{D_1 - D_2}{D_1 + D_2} \right|^n, \quad (2)$$

где D_1 и D_2 -размеры кристаллитов кремния до и после переплавки; K - коэффициент наследственности, n - коэффициент, подбираемый опытным путем.

На рисунке 1.3 показано примерное распределение коэффициента K , близкое по виду к нормальному.

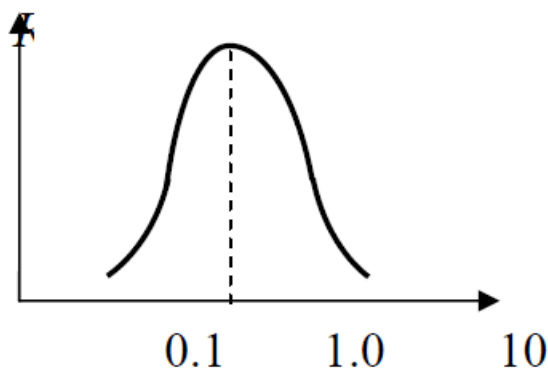


Рисунок 1.3 - Примерное распределение коэффициента K (уравнение 2)

Коэффициент K может изменяться от 0 до 1. Получено распределение для данного коэффициента, напоминающее нормальное распределение Гаусса. Ширина купола зависит от энергии, которая сообщается силумину при нагревании расплава. Чем выше температура перегрева расплава (выше температуры расплава), тем сильнее уширяется купол, и тем слабее проявляется структурная наследственность [35].

Согласно последним работам, силумины заэвтектического состава отливаются двумя основными методами: центробежным литьем и литьем в изложницу. Компоненты Cu, Ni, Fe, Mn, образующие с основными компонентами фазы, различаются по плотности, и как следствие усложняют структурообразование при литье с помощью центрифугирования. В работе [36] методом центробежного литья с разной скоростью охлаждения водой, были получены структуры, отличающиеся степенью измельчения зерна. Соответственно данный метод позволяет получать структуру заданного размера зерна.

При литье в изложницу и охлаждением водяным паром удастся получать заэвтектические силумины [36-39].

Соответственно можно сделать вывод, что размерность структуры, в основном, зависит от скорости охлаждения и только потом от метода литья.

1.7. МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЯ И СПЛАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

1.7.1 Традиционные методы

Одним из самых старых и надежных методов изменения структуры и свойств металлов является легирование добавками, улучшающими твердость, износостойкость, жаростойкость.

Основные цели легирования:

- Достижение мелкозернистой структуры;
- Достижение специальных свойств: коррозионной стойкости, жаростойкости;
- Достижение лучших технологических свойств: обработка резанием, жидкотекучесть.

Для улучшения свойств легирующие элементы должны образовывать твердые растворы. Именно по этому принципу и легированы промышленные сплавы. К наиболее популярным добавкам в алюминий можно отнести переходные металлы.

Еще на начальном этапе развития алюминиевых сплавов было замечено, что добавление десятых долей титана в состав алюминия резко измельчает зерно. Этот эффект в дальнейшем получил название модифицирование. М.В. Мальцев модифицированием называл: «...процесс искусственного изменения литого металла или сплава под воздействием небольших количеств специально вводимых добавок...» [37]. Установлено, что деформирование слитка тем труднее, чем крупнее его структура. Слитки с мелкой структурой не дают трещин [38]. Известно, что увеличение концентрации легирующих элементов выше определенной величины не приводит к дальнейшему улучшению прочностных свойств, но может их снижать, вследствие укрупнения частиц химических соединений и их коагуляции [39].

Термическая обработка является самым распространенным методом управления свойствами металлов. Любая термообработка состоит из трех

этапов: нагрев, выдержка и охлаждение. Решающую роль играет скорость охлаждения.

В некоторых сплавах, которые подвергались термообработке, фиксируются состояния пересыщенного твердого раствора. При этом основное упрочнение происходит не сразу, а после повторного нагрева или выдержки при комнатной температуре. В результате твердый раствор распадается и образуются дисперсные частицы. Такой процесс называется дисперсионным старением, термообработку, приводящую к таким эффектам, искусственной, если происходит при повышенных температурах, и естественной, если процесс протекает при комнатной температуре.

Введение добавок для получения более равновесной структуры с повышенными характеристиками можно применять при зонном старении [40]. В этом случае происходит соединение малых частиц элементов, введенных в алюминий, которые выделяются внутри зерен сплава. Старение может протекать при комнатной температуре или для ускорения процесса при температуре ≈ 200 °С.

Основные виды термической обработки алюминиевых сплавов приведены в таблице 1.3. Эти виды обработки приводят к увеличению прочности, пластичности и стабилизируют геометрические размеры материала. Но существуют и не упрочняемые сплавы. К их числу относятся деформируемые сплавы алюминия с марганцем и магнием (АМц, АМгб).

Не исключены возникновения браков при обработке: недогрев не позволяет снять напряжения, закончить перераспределение частиц в металле, перегрев приводит к интенсивному росту зерен, что влечет за собой ухудшение всех механических характеристик, образование трещин, коробление, поводка, пятнистая закалка [41].

Метод интенсивной пластической деформации позволяет получить повышенные механические и физические свойства. Равноканальное угловое прессование является одним из таких основных методов реализации деформации материала, приводимых к измельчению структуры [42].

Таблица 1.3 - Основные виды термической обработки алюминиевых сплавов [43]

Термическая обработка	Назначение	Примечание
Искусственное старение	Для улучшения обрабатываемости резанием, повышение прочности	При литье в сырую песчаную форму наблюдается некоторая подкалка, что улучшает эффект старения
Отжиг	Для уменьшения остаточных литейных напряжений, устранения наклепа, повышение пластичности	Температура и время определяются назначением детали
Закалка	Для повышения прочности	Техника соответствует закалке и естественному старению
Закалка и неполное старение	Для повышения прочности и сохранения пластичности	Температура и время не обеспечивают полного старения
Закалка и полное старение	Для получения максимальной прочности с небольшим снижением пластичности	Время и температура выше, чем при неполном старении
Закалка и стабилизирующее старение	Для получения достаточной прочности и стабилизации геометрических форм	Старение рекомендуется производить при температурах близких к рабочим
Закалка и смягчающий отпуск	Повышение стабильности, и стабилизация геометрических размеров	Самая высокая температура старения.

Исходными заготовками в методе равноканального углового прессования служат образцы с круглым или квадратным поперечным сечением. Диаметр или диагональ должна быть равна 20 мм. Максимальные диаметры заготовок, обработанные этим методом: для титана 40 мм, для алюминия 90 мм, 150 мм для молибдена; длина образцов была от 70 до 100 мм. Чтобы достичь требуемый уровень деформации образец многократно продавливается в специальной оснастке через два канала с одинаковым поперечным сечением, пересекающимися обычно под углом 90°. При необходимости угол можно увеличить, как показано на рисунке 1.4. В среднем величина скорости продавливания равна 60 мм/мин, один проход, в среднем, осуществляется за 10 секунд.

Этот метод позволяет получать массивные заготовки без пор, с ультрамелким размером зерен в субмикроструктурном или

1

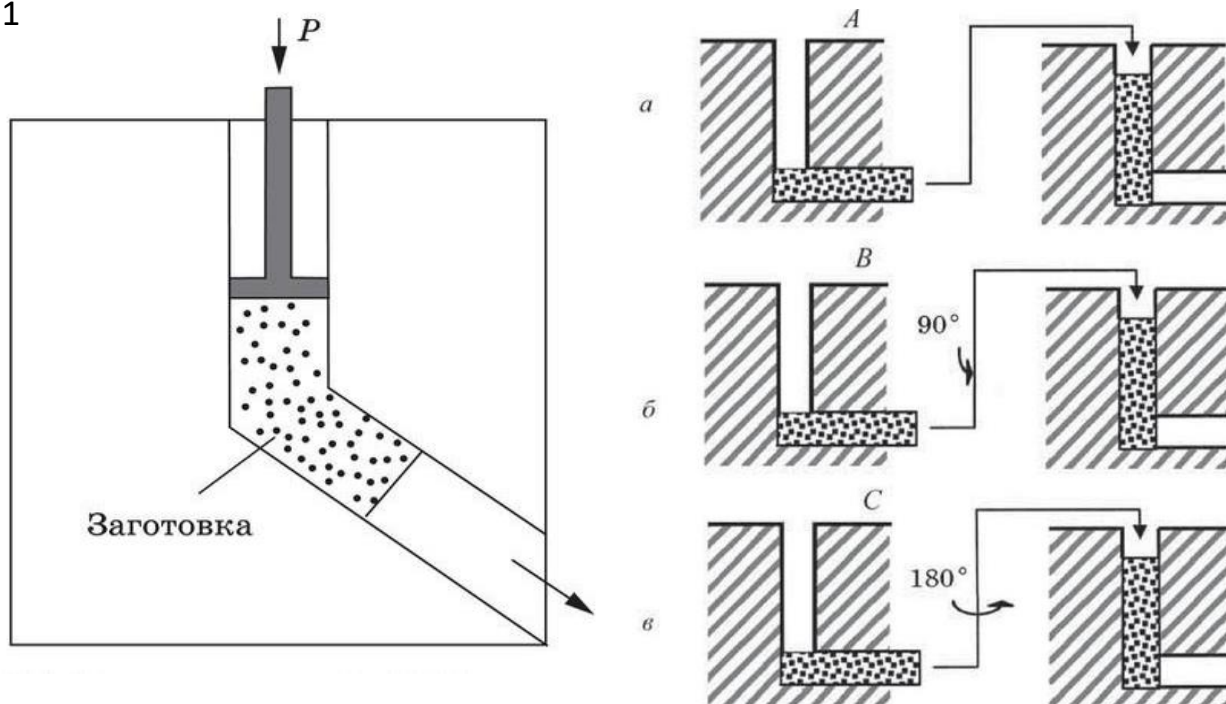


Рисунок 1.4-Принцип способа РКУ-прессования и основные типы маршрутов:

а - ориентация заготовки неизменна во всех проходах;

б - поворот заготовки на 90° после каждого прохода

в-поворот заготовки на 180° после каждого прохода [42]

нанометровом диапазоне. На данном этапе удастся получить размер зерен до 100 нм только в отдельных частях заготовки [42]. Формирование структуры определяется в большей степени направлением и числом проходов заготовки через каналы. На рисунке 1.4 представлены основные типы маршрутов при равноканальном угловом прессовании.

В [44] технически чистый алюминий и алюминиевый сплав 1420 (Al-5,5Mg-2,2Li-0,12Zn) подвергали равноканальному угловому прессованию под углом 90° , количество циклов равнялось восьми. Результаты просвечивающей электронной микроскопии показали измельчение структуры чистого алюминия. Размер субзерна лежал в диапазоне от 0,5 до 4 мкм. Микротвердость после обработки возросла почти в два раза, а пределы прочности и текучести увеличиваются в 2 и 10 раз, деформация до разрушения снижается в 2,7 раза. У сплава 1420 размер субзерна равен 2,2

мкм. Сплав 1420 демонстрирует дополнительное увеличение прочности из-за твердорастворного и дисперсного упрочнения.

Следующим методом изменения структуры является всесторонняя ковка [44]. Суть метода заключается в повторении операции (обычно до 20 циклов) свободной ковки: осадка-протяжка со сменой оси прилагаемой деформирующей силы. Обработку обычно начинают с повышенных температур, данный способ позволяет получать наноструктурные состояния даже в хрупких материалах. Обычно температуру выбирают 0,3-0,6 от температуры плавления. Этим методом был получен размер зерна до 100 нм в титане, сплаве Ti-6%Al-32%Mo, высокопрочных высоколегированных никелевых сплавах.

Оба метода пластической деформации имеют ряд преимуществ, к которым можно отнести возможность получения материалов с наноструктурой, создание непрерывного процесса на базе РКУ-прессования.

Основные недостатки:

- малый геометрический размер продукта;
- анизотропная микроструктура;
- сложное оборудование.

1.7.2 Методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии

Анализируя современные методы упрочнения поверхности стальных деталей можно выявить направление, использующее концентрированные потоки энергии. Концентрированный поток энергии представляет собой энергетический поток, направленный на определенный локальный участок на поверхности с плотностью тепловой мощности 10^3Вт/см^2 [44, 45]. Благодаря этим методам удается добиться больших скоростей нагрева и охлаждения, что позволяет повысить концентрацию дефектов в обработанном материале, изменить их распределение и получить новые свойства. Первыми начинали применять лазерные, затем электронно-лучевые и плазменные источники

нагрева. Эти методы объединяет подвод энергии в локальную точку и теплоперенос на соседние, высокоскоростное охлаждение.

Основной особенностью данных методов так же является протекание фазовых и структурных превращений вдали от равновесных [46]. С учетом того что нагретый участок составляет лишь малую часть от всего модифицируемого материала, то отношение скорости отвода тепла к критической скорости закалки больше 1 [47].

По сравнению с традиционными методами модификации, легирование поверхности при локальном нагреве и высоких скоростях плавления и кристаллизации обладает целым рядом преимуществ [48]:

- ресурсоэффективность;
- минимизация последующей механической обработки;
- не требуется последующая термообработка;
- контролируемость процесса;
- не предъявляются требования к геометрии поверхности, наличием электрических и магнитных полей;
- высокая скорость обработки, получение высококачественных изделий;
- воспроизводимость параметров упрочняемого слоя.

В качестве источников концентрированных потоков энергии нашли применения импульсные лазерные, плазменные, ионные и электронные пучки.

В настоящее время используются лазеры с длиной волны 0,3-10,6 мкм [47, 49]. Лазеры нового поколения имеют достаточно высокий КПД, который у диодных лазеров достигает 50%. Нагрев представляет собой наиболее используемый метод поверхностного упрочнения лазером приводящих к фазовым превращениям. Путем плавления можно осуществлять легирование, аморфизацию, лазерную очистку зерен. Необходимо использовать покрытия, поглощающие лазерное излучение, так

как алюминий при нормальных условиях отражает 97% падающего потока излучения [50].

Основные преимущества упрочнения лучом лазера: упрочнение особых зон, труднодоступных полостей. Возможность получения заданных физико-механических свойств, отсутствие коробления и деформации деталей, отсутствие механического воздействия, которое может привести к накоплению дефектов в структуре.

Основные недостатки: недолговечность линз, возможность образования пор, малая производительность при большой протяженности материала, дороговизна процесса.

Плазменную наплавку выполняют током прямой полярности, который воздействует постоянно. По виду применяемого присадочного материала способы наплавки делятся на три группы [50]:

- наплавка проволокой и прутками;
- наплавка при неподвижной присадке;
- наплавка порошком.

Вид материала определяется конструкцией установки для нанесения и наплавления.

Материалы в переходной области значительно отличающиеся по составу, могут оказывать воздействие на служебные характеристики при эксплуатации покрытий. Поэтому после наплавки детали подвергаются отпуску или термической обработке в целом.

Основные недостатки данного метода, существующие на данный момент, - большая теплоотдача в основной металл, что может вызвать изменение геометрических форм. Необходимость защиты от окисления, сложность и дороговизна оборудования.

Способ обработки поверхности ионными пучками - универсальный, дает возможность введения в любой материал других элементы в строго контролируемой концентрации. Приводит к формированию большого

количества дефектов в поверхности, что оказывает прямое воздействие на свойства.

Ионная имплантация по сравнению с нанесением покрытий имеет ряд преимуществ:

1. Поверхностные свойства изменяются независимо от всего объема материала;
2. Низкие температуры позволяют избежать изменения объемных свойств;
3. Использование ионной имплантации не изменяет шероховатость поверхности образца.

Электронно-лучевое воздействие на материал делится на два типа: электронно-лучевое облучение и электронно-лучевую наплавку.

Облучение основано на формировании пучка электронов в электронной пушке, который используется в качестве энергоносителя. Данный метод позволяет реализовать и сформировать аморфную структуру, ударное упрочнение.

Авторы работы [50] утверждают, что с помощью данного метода возможно повышение износостойкости резцов марки T5K10. При этом изменяются параметры решетки, величина микроискажений, но не обнаруживаются новые фазы.

Электронно-лучевая наплавка и легирование приводят к увеличению механических и структурных свойств титановых сплавов, меди [51]. Этот метод позволяет уменьшить стоимость конструкций с одновременным увеличением срока службы. Данный метод позволяет минимизировать воздействие атмосферы на металл, но не убирает его полностью. Поэтому чаще применяют наплавку в вакууме.

Электронно-лучевая обработка основывается на превращении энергии кинетической в тепловую, которая выделяется при столкновении электронов с материалом. Оборудование обычно состоит из электронной пушки, вакуумной камеры, источника питания и центра управления. В электронной

пушке происходит генерирование электронов, формирование пучка и его последующее ускорение.

Основное преимущество электронно-лучевой наплавки – возможность обработки широкого спектра материалов, возможность автоматизации процесса, кроме того этот метод позволяет изготавливать фасонные щели и пазы в труднообрабатываемых материалах, например, в рубине [52].

Для модифицирования структуры поверхностного слоя и образования сплавов должна быть реализована возможность изменять его состав при неизменном составе основного объема материала. Облучение ионными, лазерными, электронными пучками можно рассматривать как рядовые методы для достижения поставленных задач. Состав можно изменять ионной имплантацией, причем для металлических мишеней предельная концентрация равна 30%, для достижения более высоких концентраций необходимо предварительно напылить пленку, а затем применить атомное перемешивание. Оно может быть осуществлено различными способами, в частности ионной бомбардировкой, импульсным плавлением. Быстрое затвердевание, следующее за облучением, способно изменить структуру трудно предсказуемым образом.

2. МАТЕРИАЛ, МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ научных работ, показанных в первой части выявляет, что одним из недостатков заэвтектического силумина являются неравномерное распределение элементного состава и свойств материала. Исходя из этого, *целью настоящей работы* являлась разработка метода модификации структуры и свойств поверхностного слоя заэвтектического силумина путем обработки высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, напыления и последующего легирования атомами циркония, титан и меди, основанного на обработке системы «пленка (TiZrCu) / (Al-(22-24) вес.% Si) подложка» высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Провести исследование структуры поверхностного слоя сплава Al-(22-24) вес.% Si после электронно-пучковой обработки;
2. Выявить оптимальный режим обработки сплава Al-(22-24) вес.% Si импульсным электронным пучком;
3. Провести исследования структуры поверхностного сплава, сформированного методом облучения системы «пленка (TiZrCu) / (Al-(22-24) вес.% Si) подложка» высокоинтенсивным импульсным электронным пучком;
4. Выполнить механические и трибологические испытания сформированных поверхностных сплавов на основе алюминия;
5. Выявить оптимальные режимы формирования поверхностного сплава на основе алюминия при облучении заэвтектического силумина и системы «пленка / подложка» высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

В качестве материала исследования были использованы образцы заэвтектического силумина, изготовленные специалистами БГУ и ФТИ НАН Белоруссии, г. Минск.

На первом этапе с использованием установки «СОЛО» была проведена обработка поверхности силумина интенсивным импульсным электронным пучком с целью формирования однородной субмикро- и наноразмерной структуры. Проведены механические и трибологические исследования свойств силумина до и после облучения электронным пучком.

На втором этапе на установке «ТРИО» наносили покрытие состава Ti-6%Zr -6%Cu (толщина покрытия 0,5 мкм) с последующим изучением структуры и свойств полученной системы.

На третьем этапе система «пленка (TiZrCu) / (Al-(22-24) вес.% Si) подложка» подверглась обработке интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО»).

Перед модифицированием поверхность образцов шлифовали и полировали на шлифовально-полировальном станке «Полилаб» (рисунок 2.1).

С помощью оптического микроскопа «Микровизор металлографический μ Vizo -MET-221» была изучена структура поверхности модифицирования методами металлографии (рисунок 2.2).

Микротвердость модифицированной поверхности определяли на приборе ПМТ-3 (нагрузка на индентор 0,1 Н) по методу Виккерса (рисунок 2.3).

Исследования элементного и фазового состава, дефектной субструктуры поверхности модифицирования осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор SEM-515 Philips) (рис. 2.4). Изучение состояния кристаллической решетки, определение фазового состава материала проводили методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000, съемка осуществлялась в медном отфильтрованном излучении Cu-K α 1; монохроматор CM-3121) (рис. 2.5).

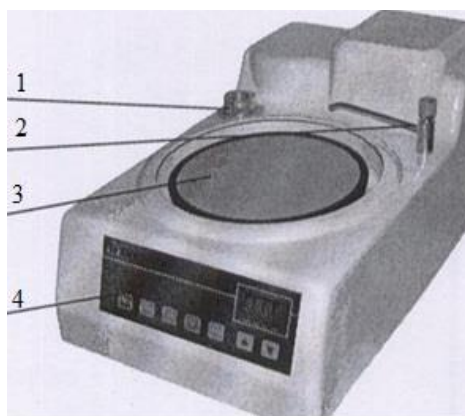


Рисунок 2.1-Шлифовально - полировальный станок «Полилаб»



Рисунок 2.2-Микровизор металлографический μVizo - MET-221P



Рисунок 2.3-Микротвердомер ПМТ-3



Рисунок 2.4- Растровый электронный микроскоп Philips SEM 515



Рисунок 2.5- Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000

Трибологические свойства поверхностных сплавов Al-Si и TiZrCu /Al-Si изучали при сухом трении по схеме диск-шарик на установке TRIBOtechnic (рис. 2.6). Индентором (контртелом) служил шарик диаметром 3 мм из твердого сплава WC-Co. Испытания проводили при комнатной температуре и относительной влажности 50 % при следующих условиях: нормальная нагрузка на индентор 1 Н, скорость скольжения 3,5см/с, диаметр дорожки 5 мм, число оборотов (циклов) 1000. Объем износа материала определялся после проведения профилометрии образовавшегося трека.



Рисунок 2.6-Внешний вид установки TRIBOtechnic

Характеристики упроченного поверхностного слоя изучали с помощью наноиндентера NanoTest 600 при нагрузке, изменяющейся ступенчатым образом в интервале от 10 мН до 300 мН (рисунке 2.7).

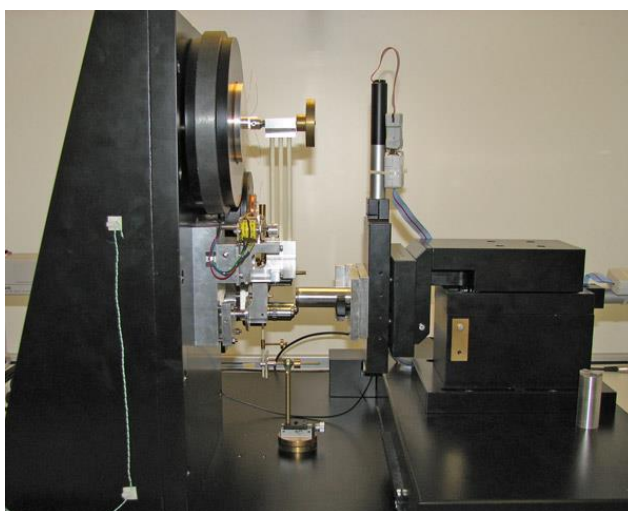


Рисунок 2.7-Установка наноиндентирования NanoTest 600

2.1 Формирование системы пленка/подложка

На поверхность подложки (заэвтектический силумин) наносили вакуумно-дуговым методом с плазменным ассистированием пленку сплава состава Ti- 6%Zr -6%Cu толщиной 0,5 мкм. Для нанесения пленки использовали ионно-плазменную установку «ТРИО», оснащенную двумя модернизированными электродуговыми испарителями ДИ-100 с усиленным охлаждением испаряемого катода и оригинальным плазменным источником на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом

«ПИНК» (установка Института сильноточной электроники СО РАН). Внешний вид установки «ТРИО» представлен на рис. 2.8. Процесс напыления включал в себя очистку, активацию, травление рабочих поверхностей подложек в плазме дугового разряда низкого давления и собственно синтез вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом пленки сплава Zr-Ti-Cu.



Рисунок 2.8-Ионно-плазменная установка «ТРИО» для формирования пленок и покрытий

2.2 Формирование поверхностного сплава

Облучение системы пленка/подложка высокоинтенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» (установка Института сильноточной электроники СО РАН). Внешний вид установки «СОЛО» представлен на рис. 2.9.

Электронный пучок является эффективным источником сверхбыстрого нагрева поверхности материалов и изделий.

Данная установка может быть использована для самозакалки, сглаживания геометрических особенностей изделия путем импульсного нагрева. Генерация электронного пучка осуществляется с использованием плазменного катода с сеточной стабилизацией эмиссионной границы, что

обеспечивает высокую энергетическую эффективность; широкий диапазон регулировки параметров пучка.



Рисунок 2.9-Внешний вид установки электронно-пучковой обработки неорганических материалов «СОЛО»

Установка включает низкоэнергетический импульсный источник электронов; рабочую камеру с системой вакуумной откачки; шкаф высоковольтного электропитания; стойку управления и контроля. Основные параметры установки «СОЛО» приведены в таблице 2.1.

Области применения напрямую связаны с обработкой металлов: технологические, опытно-конструкторские и учебные учреждения.

Использование установки "СОЛО" позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности изделий; многократно повысить микротвердость поверхности металлических деталей и изделий; производить модификацию поверхностного слоя металлических изделий глубиной до сотни микрометров.

Основная особенность обработки материала импульсным электронным пучком заключается в больших скоростях нагрева и охлаждения (до 10^8 К/с) тонкого поверхностного слоя до температур

формирования расплава, что неизбежно приводит к изменению свойств поверхностного слоя материала.

Таблица 2.1-Основные параметры установки СОЛО

Основные параметры:		
Диаметр вакуумной камеры		700 мм
Длина вакуумной камеры		500 мм
Рабочее давление		10^{-2} Па
Диаметр пучка		1—3 см
Ток пучка		20—200 А
Энергия электронов		5—20 кэВ
Длительность импульса		30—200 мкс
Частота следования имп.		До 10 с^{-1}

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Структура заэвтектического силумина в исходном состоянии

В качестве материала исследования был использован силумин заэвтектического состава (Al-(22-24) вес. % Si), находящийся в литом состоянии. Форма образцов – цилиндр высотой 5 мм, диаметром 30 мм.

Структура силумина заэвтектического состава в исходном состоянии характеризуется наличием включений первичного кремния преимущественно пластинчатой формы, размеры которых (продольные) достигают 100 мкм (рисунок 3.1). Наряду с пластинами кремния выявляются включения интерметаллидных фаз (рисунок 3.1, б), частицы интерметаллидов указаны стрелками). Явным недостатком заэвтектического силумина в литом состоянии является наличие пор микронных и субмикронных размеров.

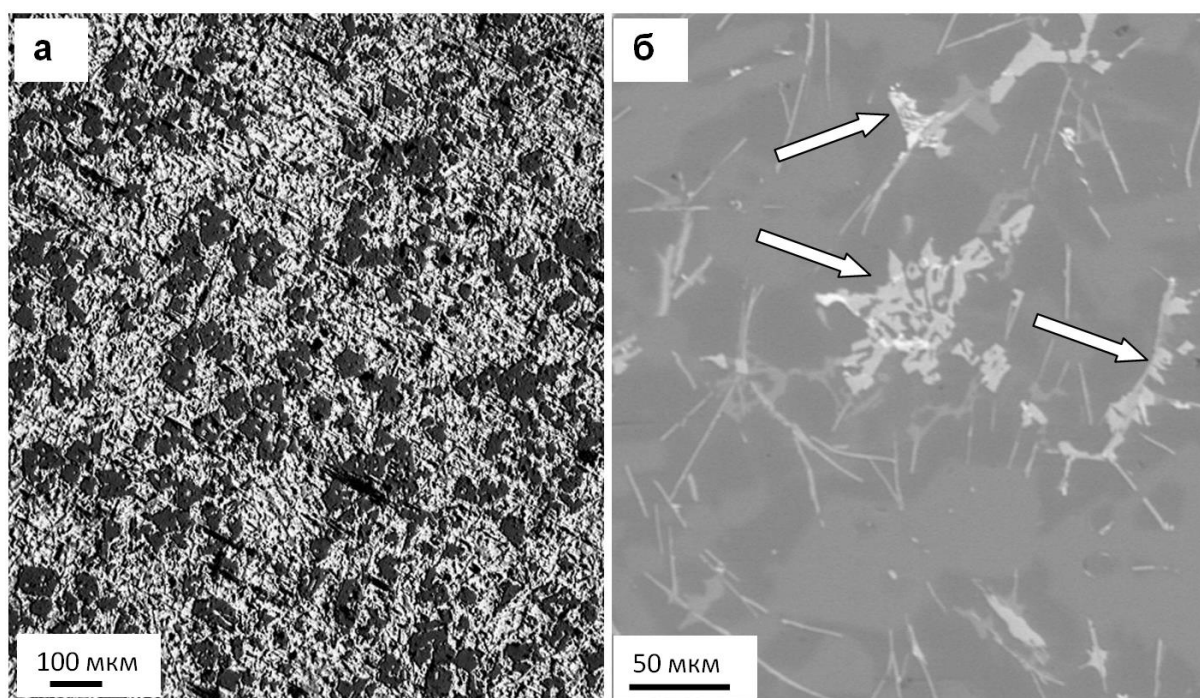


Рисунок 3.1- Структура заэвтектического силумина в литом состоянии: а) - оптическая микроскопия, б) - изображение, полученное методами сканирующей электронной микроскопии.

Рентгеноструктурный анализ (участок рентгенограммы представлен на рисунке 3.2) выявил в литом силумине наличие двух основных фаз – твердый раствор на основе алюминия и твердый раствор на основе кремния.

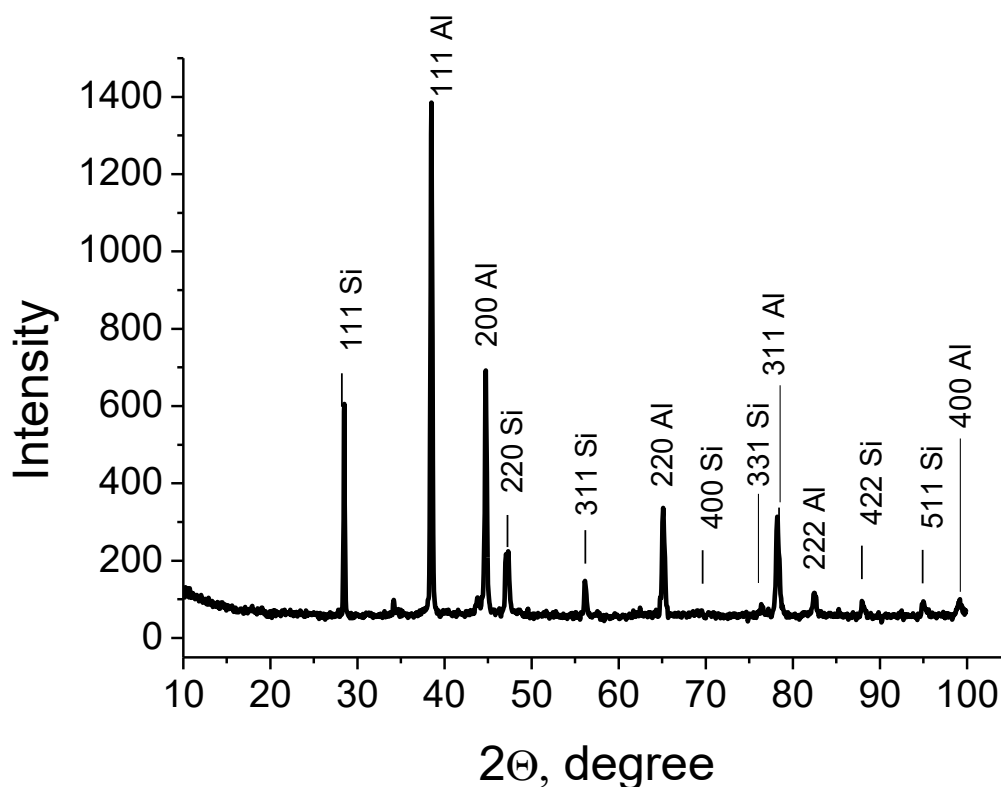


Рисунок 3.2 – Участок рентгенограммы литого силумина заэвтектического состава

Дополнительными фазами исследуемого силумина являются интерметаллиды и оксиды. Анализ рентгенограмм выявил наличие низкоинтенсивных дифракционных максимумов фаз $Mg_{0.54}Fe_{0.46}SiO_3$, $Al_{0.83}Mg_{0.17}$, MgO и $NiO (Ni, Mg)O$.

Элементный состав силумина в исходном состоянии определяли методами микрорентгеноспектрального анализа, используя приставку к сканирующему электронному микроскопу. Результаты анализа, усредненные по площади исследуемого материала, представлены в таблице 3.1.

Микрорентгеноспектральный анализ позволяет исследовать отдельно взятые включения (анализ по точкам). Результаты такого анализа приведены на рисунке 3.3. Микрорентгеноспектральный анализ включения пластинчатой формы (рисунок 3.3, включение выделено овалом) выявил повышенное, по отношению к среднему значению по материалу (см. таблицу 3.1), содержание в нем атомов железа, никеля и меди.

Таблица 3.1 - Элементный состав силумина заэвтектического состава в литом состоянии

Элемент	Вес. %	Атом. %
Al	74,05	75,84
Si	22,57	22,21
Mg	0,56	0,64
Fe	1,29	0,64
Ni	0,52	0,24
Cu	1	0,44
Сумма	100	100

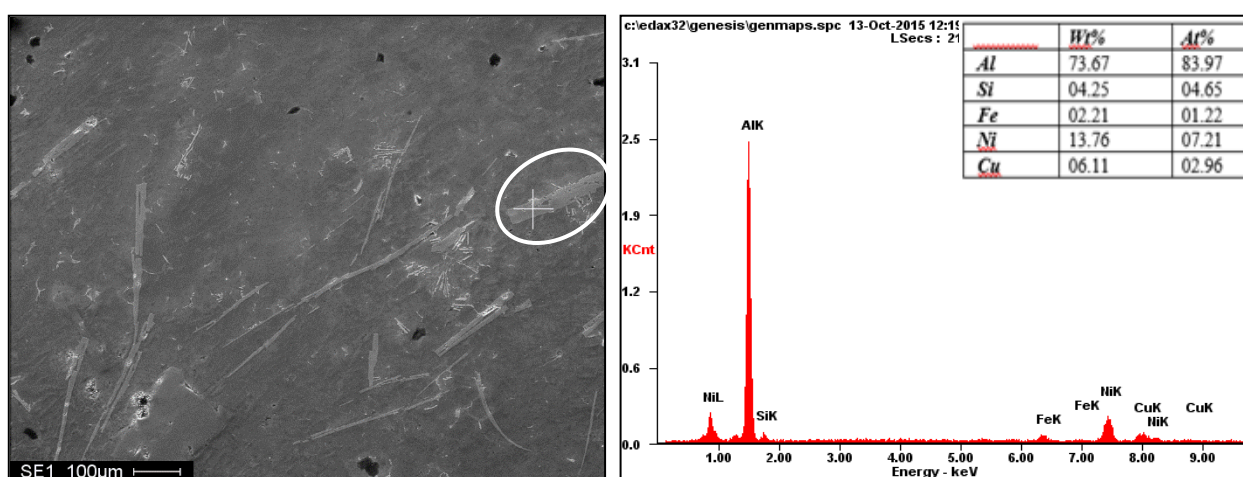


Рисунок 3.3 - Энергодисперсионный анализ включения, выделенного овалом

Механические свойства образцов силумина заэвтектического состава в литом состоянии характеризовали величиной микротвердости. Установлено, что микротвердость силумина, усредненная по 10 измерениям, составляет 3530 МПа. Трибологические характеристики исследуемого силумина характеризовали коэффициентом износа (величина, обратная износостойкости) и коэффициентом трения. Установлено, что коэффициент износа силумина равен $5,5 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н*м, коэффициент трения – 0,43.

Таким образом, выполненные исследования структуры, элементного и фазового состава показали, что силумин заэвтектического состава в литом состоянии характеризуется наличием грубых кристаллов первичного кремния и интерметаллидов. Данное обстоятельство может указывать на низкие служебные характеристики материала.

3.2 Структура заэвтектического силумина, обработанного интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО»

Облучение образцов силумина осуществляли, как показали выполненные ранее расчеты температурного поля [53-55], в режиме плавления всех присутствующих в материале фаз (18 кэВ; 40 Дж/см²; 200 мкс; 0,3 с⁻¹; 20 имп.). На рисунке 3.4 приведены микрофотографии поверхности образцов, обработанных интенсивным импульсным пучком. Количество микропор значительно снижается благодаря высокоскоростному плавлению и последующей высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя. Размеры кристаллов, которые составляют структуру модифицированного слоя, изменяются в пределах (0,4...0,5 мкм) (рисунок 3.4, б). Микрорентгеноспектральный анализ показывает, что концентрация кремния в поверхностном слое изменяется в пределах (10...12) ат. %, что соответствует составу эвтектики сплава алюминий-кремний.

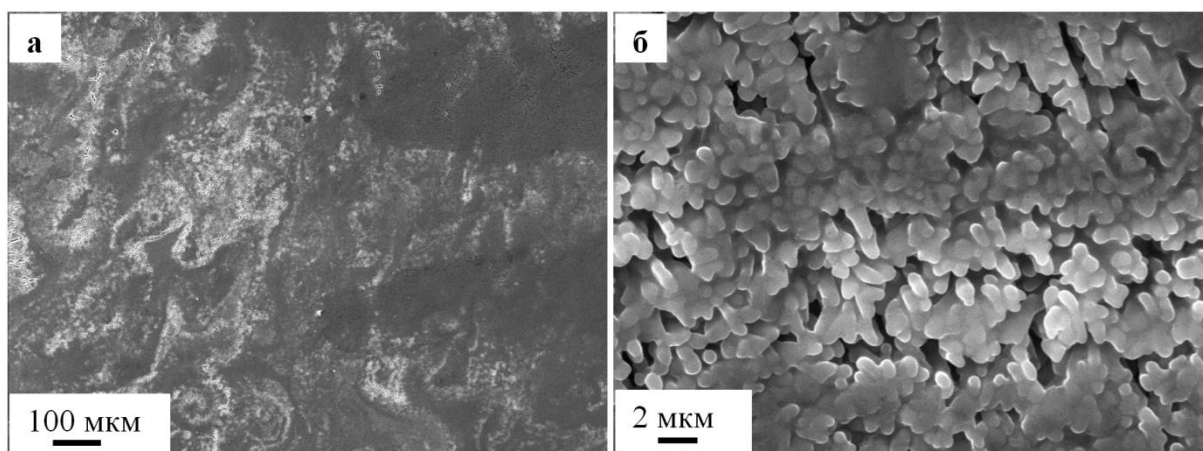


Рисунок 3.4 - Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности литого силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком

Анализ структуры поперечного шлифа выявил формирование многослойной структуры, характерное изображение которой приведено на рисунке 3.5. Присутствует тонкий (2-4 мкм) поверхностный слой со столбчатой структурой и слой с зеренной структурой (размер зерен 2-4 мкм)

(рисунок 3.5, б). По границам зерен наблюдаются включения второй фазы, которые могут являться частицами кремния. Глубина проплавленного слоя составила (100-130) мкм (рисунок 3.5, а).

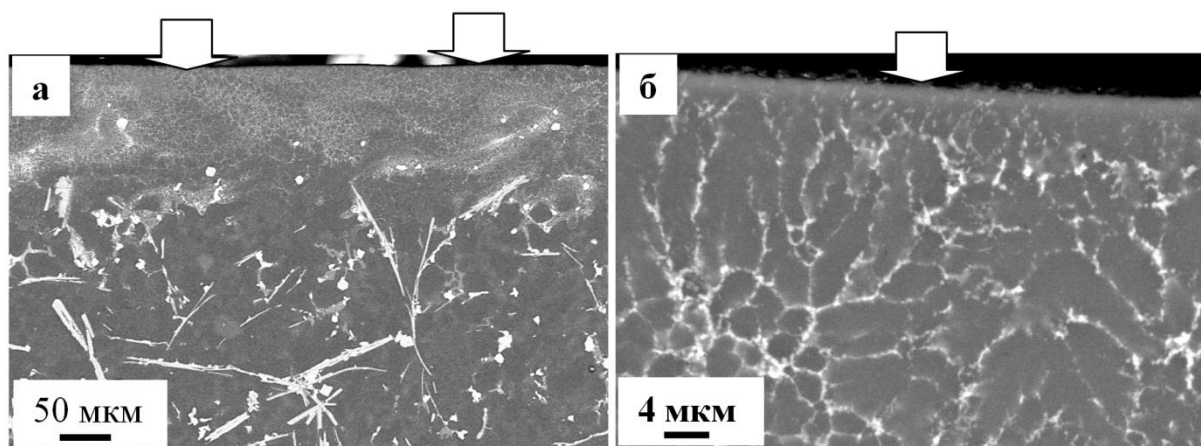


Рисунок 3.5 – Структура силумин, сформировавшаяся в результате воздействия интенсивного импульсного пучка электронов; стрелками указана поверхность облучения

Рентгеноструктурный анализ модифицированного образца показал, что воздействие электронного пучка приводит к кратному (в 2...3 раза) уменьшению размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) и алюминия, и кремния. Увеличение параметров кристаллических решёток алюминия и кремния, обусловлено растворением интерметаллидов и легированием кристаллической решетки алюминия и кремния атомами примесных элементов (магний, железо, медь, никель). Данное предположение подтверждается отсутствием дифракционных линий интерметаллидных фаз на рентгенограмме.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа силумина, обработанного интенсивным импульсным электронным пучком, выявленные при исследовании структуры поперечного шлифа, приведены на рисунке 3.6.

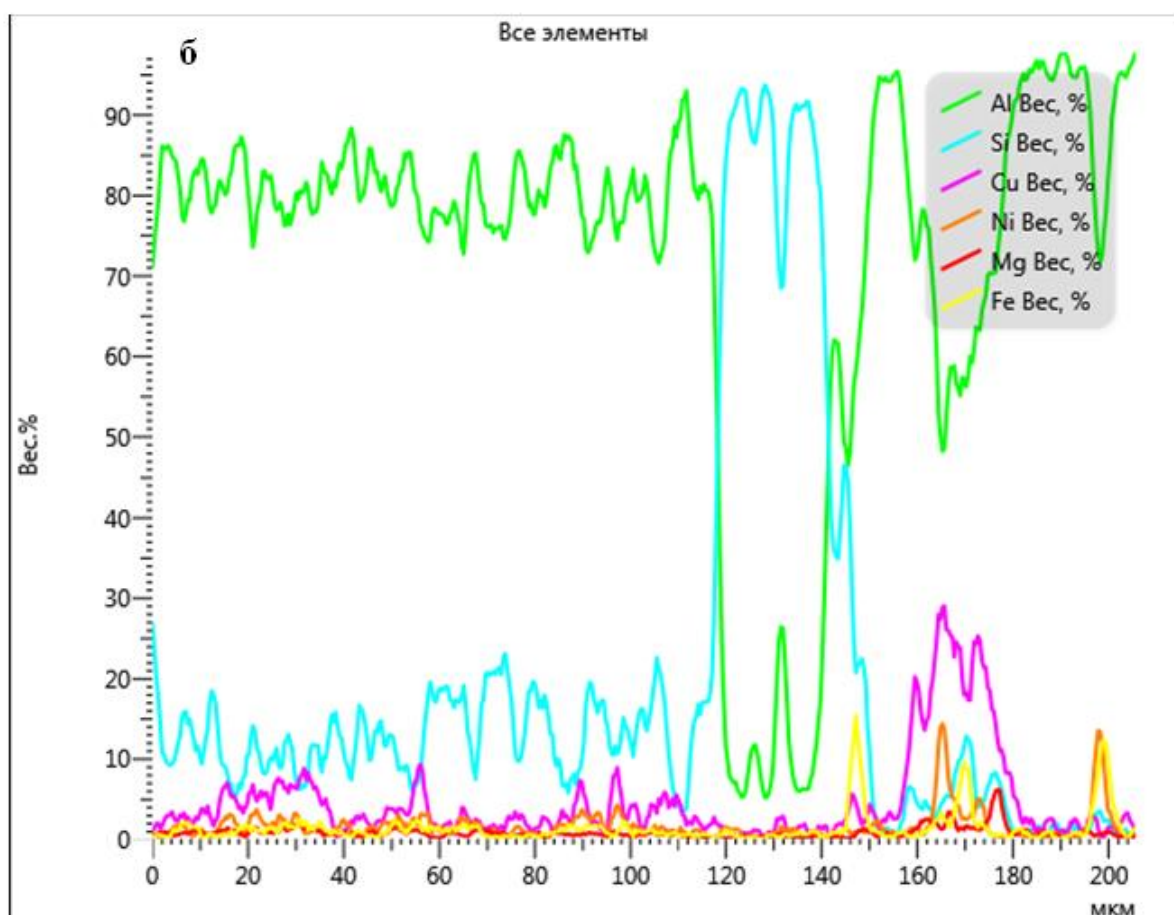
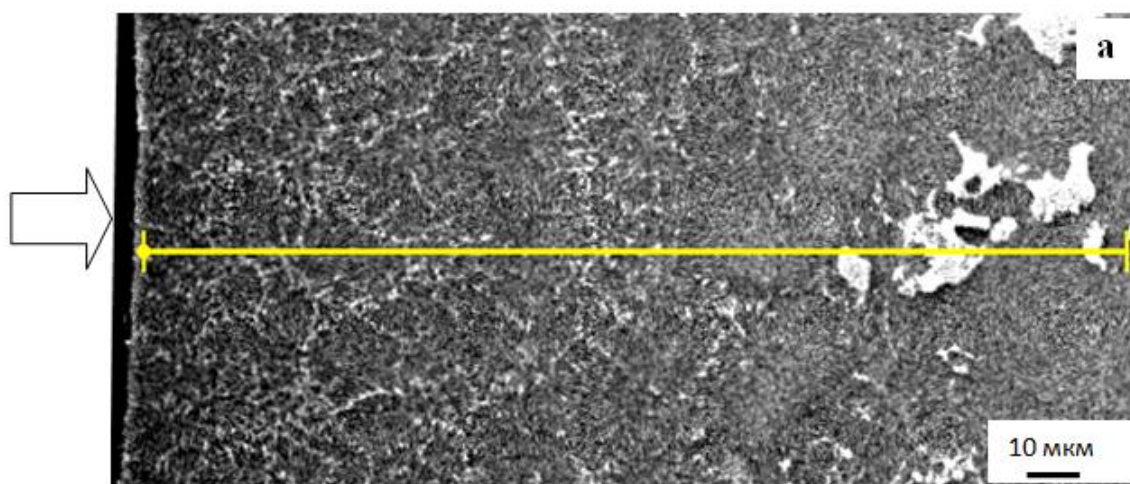


Рисунок 3.6 – Микрорентгеноспектральный анализ элементного состава силумина, облученного интенсивным импульсным электронным пучком; а – изображение структуры поперечного шлифа; б – распределение концентрации элементов вдоль линии, указанной на (а). Стрелкой указана поверхность облучения

Анализируя результаты, представленные на рисунке 3.6, можно отметить, что в поверхностном слое толщиной ≈ 110 мкм концентрация

кремния изменяется в пределах от 5 до 27 вес. %; концентрация атомов примесных элементов (меди) – в пределах от 1 до 7 вес. %. При большем удалении от поверхности облучения неоднородность в распределении кремния и примесных элементов резко возрастает. Это означает, что облучение заэвтектического силумина интенсивным импульсным электронным пучком (18 кэВ; 40 Дж/см²; 200 мкс; 0,3 с⁻¹; 20 имп.) сопровождается диспергированием включения кремния и интерметаллидов в поверхностном слое толщиной (100-110) мкм. В среднем же концентрация элементов, выявленная при суммировании вдоль линии (рисунке 3.6, а), соответствует элементному составу исходного силумина (рисунок 3.7).

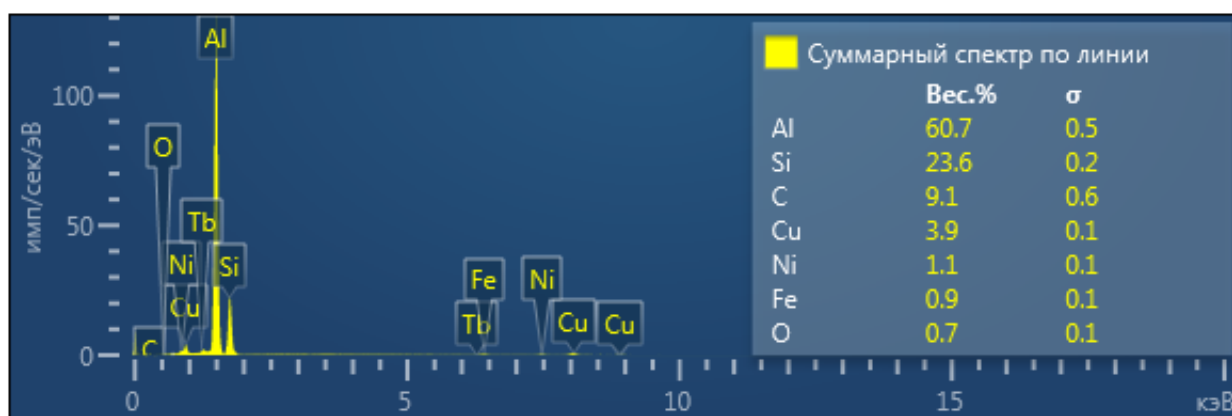


Рисунок 3.7 – Энергетические спектры элементов, присутствующих в поверхностном слое заэвтектического силумина, обработанного электронным пучком. В таблице приведена суммарная концентрация элементов вдоль линии (рисунок 3.6, а)

Модифицирование силумина интенсивны импульсным электронным пучком приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя до 5876 МПа, т.е. в $\approx 1,7$ раза; коэффициент износа силумина равен $4,5 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н*м, что соответствует увеличению износостойкости в $\approx 1,2$ раза. Коэффициент трения материала при этом практически не изменяется.

Таким образом, выполненные исследования структуры, элементного и фазового состава силумина заэвтектического состава, облученного интенсивным импульсным электронным пучком, демонстрируют кардинальное изменение структуры поверхностного слоя. Установлено, что в

поверхностном слое толщиной ≈ 100 мкм формируется структура с квазиравномерным распределением атомов кремния и примесных элементов. Очевидно, что это обусловлено высокоскоростным режимом плавления и последующей высокоскоростной кристаллизацией данного поверхностного слоя, имеющих место при электронно-пучковой обработке силумина. Диспергирование структуры силумина сопровождается увеличением микротвердости поверхностного слоя в $\approx 1,7$ раза, а износостойкости в $\approx 1,2$ раза.

3.3 Формирование системы «пленка (Zr-Ti-Cu)/(Al-Si) подложка»

Одним из альтернативных методов повышения механических и трибологических характеристик материала является легирование поверхностного слоя некоторой толщины. С этой целью на поверхность детали или изделия напыляют тонкую пленку легирующих элементов и переплавляют с поверхностным слоем подложки, используя концентрированные потоки энергии (лучи лазера, потоки плазмы, электронные пучки).

В настоящей работе на поверхность силумина напыляли сплав состава Zr-5%Ti-5%Cu. Систему «пленка (Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес.% Si) подложка» формировали ионно-плазменным методом при электродуговом распылении катода состава Zr-5%Ti-5%Cu на установке «ТРИО» (ИСЭ СО РАН) [56]. Толщина пленки 0,5 мкм. Характерное изображение пленки, формирующейся на поверхности силумина, приведено на рисунке 3.8. Отчетливо видно, что электродуговое распыление катода сопровождается формированием на поверхности силумина тонкой пленки, содержащей большое количество капельной фракции. Размеры капель, выявленных методами сканирующей электронной микроскопии, изменяются в пределах от единиц микрометров до нескольких десятков микрометров.

Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлен элементный состав поверхностного слоя системы «пленка/подложка», приведенный на рисунке 3.9.

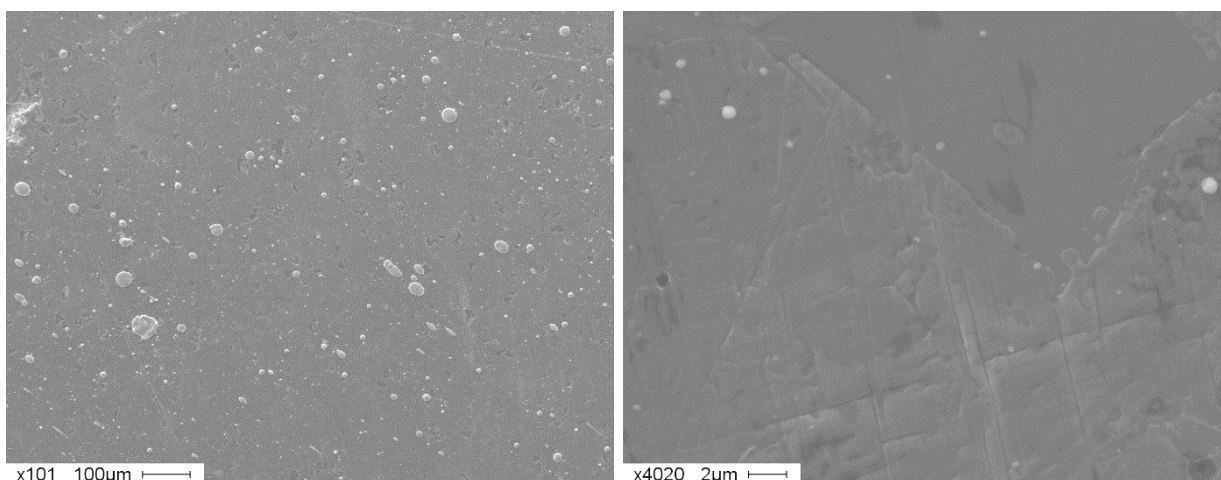


Рисунок 3.8 - Структура пленки, сформированной на поверхности силумина при распылении катода состава Zr-5%Ti-5%Cu

Результаты, представленные на рисунке 3.9, демонстрируют наличие всех элементов, присутствовавших в исходном материале, а также элементы напыляемой пленки.

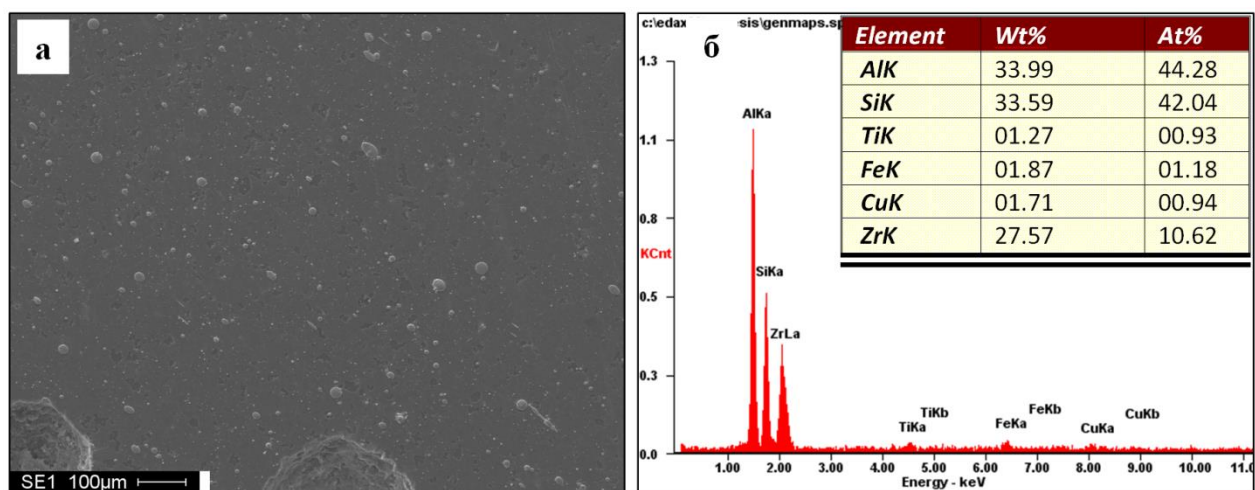


Рисунок 3.9 - Энергодисперсионный анализ системы «пленка- (Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка»

Результаты микрорентгеноспектрального анализа капельной фракции представлены на рисунке 3.10 (частица с которой получены энергетические

спектры, указана стрелкой). Отчетливо видно, что капли на пленке сформированы преимущественно атомами циркония.

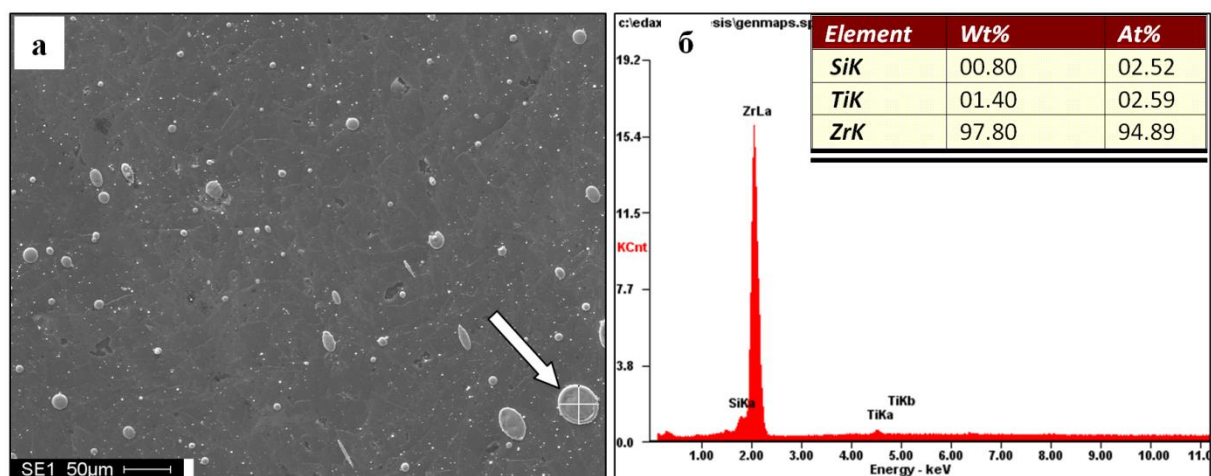


Рисунок 3.10 - Энергодисперсионный анализ системы «пленка- (Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка». Энергетические спектры получены с капли, указанной на (а) стрелкой

Фазовый состав системы «пленка- (Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка» изучали методами рентгеноструктурного анализа. Результаты рентгенофазового анализа представлены на рисунке 3.11 и в таблице 3.2. Отчетливо видно, что наряду с фазами, формирующими подложку (Al и Si), присутствуют фазы, сформировавшиеся при напылении пленки (Ti, Zr, CuZr и SiC).

Таблица 3.2 – Фазовый состав системы «пленка- (Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка», выявленный методами рентгенофазового анализа

Фазы	%
Al	28,9
Si	26,0
Ti	5,1
CuZr	0,2
Zr	10,8
SiC	28,9

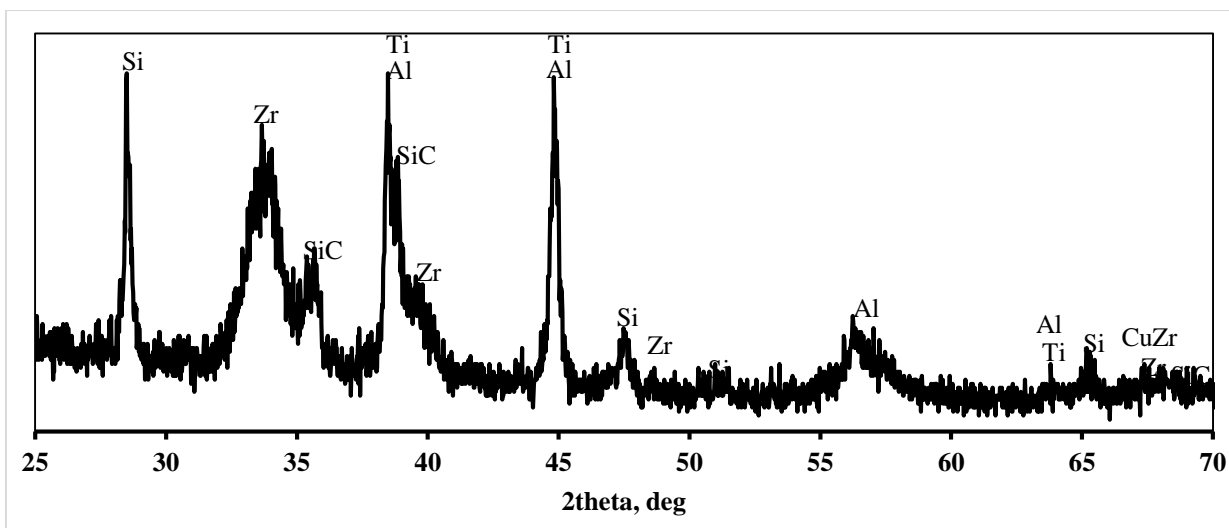


Рисунок 3.11 – Участок рентгенограммы поверхностного слоя системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка»

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что при электродуговом распылении катода состава Zr-5%Ti-5%Cu на поверхности силумина формируется пленка, представленная элементами распыляемого катода. Пленка содержит большое количество микрокапель, обогащенных атомами циркония. Формирование системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка» приводит к снижению микротвердости поверхностного слоя до 2310 МПа, т.е. в $\approx 1,5$ раза; коэффициент износа системы «пленка/подложка» равен $5,8 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н*м, что соответствует износостойкости силумина в литом состоянии.

3.4 Формирование поверхностного сплава при облучении системы «пленка (Zr-Ti-Cu)/(Al-Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО»

Легирование поверхностного слоя силумина заэвтектического состава осуществляли путем плавления системы «пленка-подложка» интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО». Режимы облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 40 Дж/см², частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, длительность воздействия пучка электронов 200 мкс, число импульсов воздействия 20.

На рисунке 3.12 представлено изображение структуры поверхности силумина, формирующейся при облучении системы «пленка (Zr-Ti-Cu)/(Al-Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. Прежде всего, обращает на себя внимание практически полное отсутствие микрокапельной фракции (сравни с рисунком 3.8 и рисунком 3.10). Второй особенностью образующейся при облучении структуры является формирование поликристаллической структуры с размером кристаллитов, изменяющемся в пределах (0,5-1) мкм (рисунок 3.12, б).

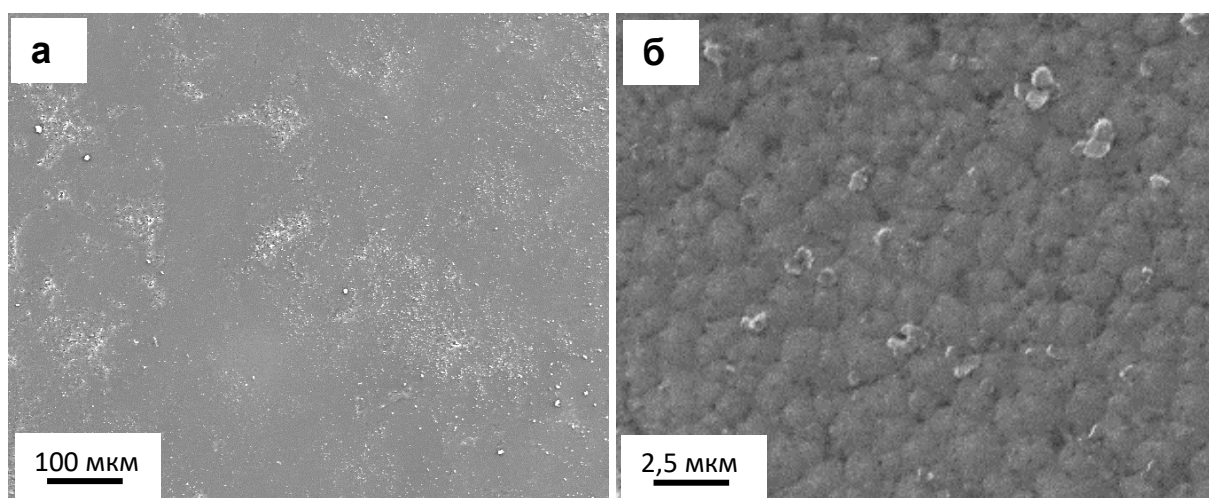


Рисунок 3.12 - Структура пленки, сформированной на поверхности силумина при облучении системы «пленка (Zr-Ti-Cu)/(Al-Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛЮ»

На рисунке 3.13 и рисунке 3.14 представлено изображение структуры поперечного сечения системы «пленка (Zr-Ti-Cu)/(Al-Si) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком. Отчетливо видно, что в слое толщиной (100-150) мкм формируется квазиоднородная структура размеры кристаллитов которой изменяются в пределах 1-5 мкм. Можно предположить, что данный слой сформировался в результате высокоскоростного плавления и последующей высокоскоростной кристаллизации материала. Следовательно, можно говорить о жидкофазном легировании поверхностного слоя силумина элементами напыленной пленки.

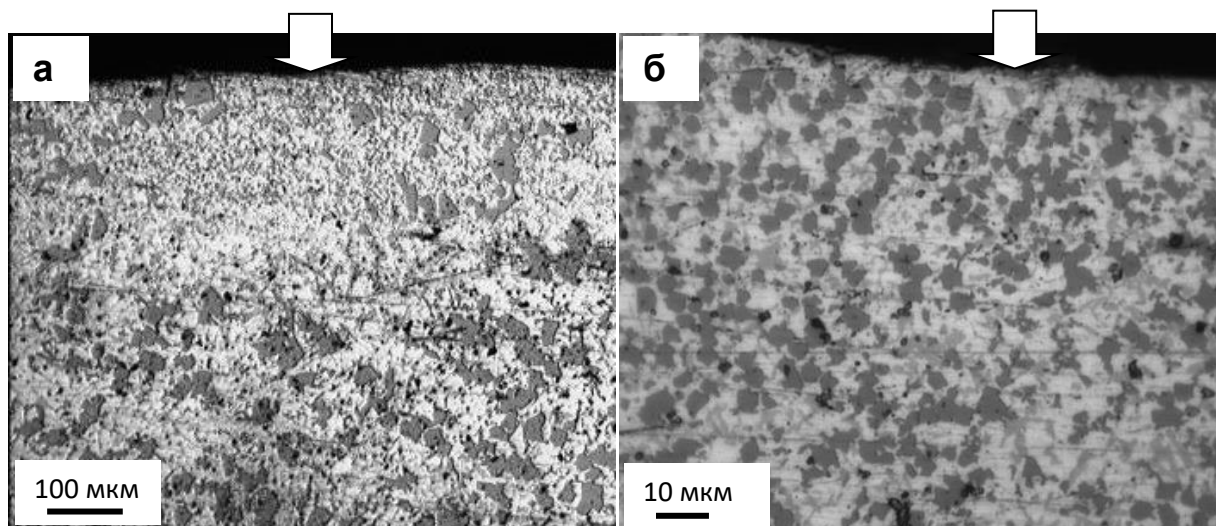


Рисунок 3.13 – Структура поперечного сечения образца заэвтектического силумина, подвергнутого поверхностному легированию путем облучения системы «пленка (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. Стрелками указана поверхность облучения.

Оптическая микроскопия

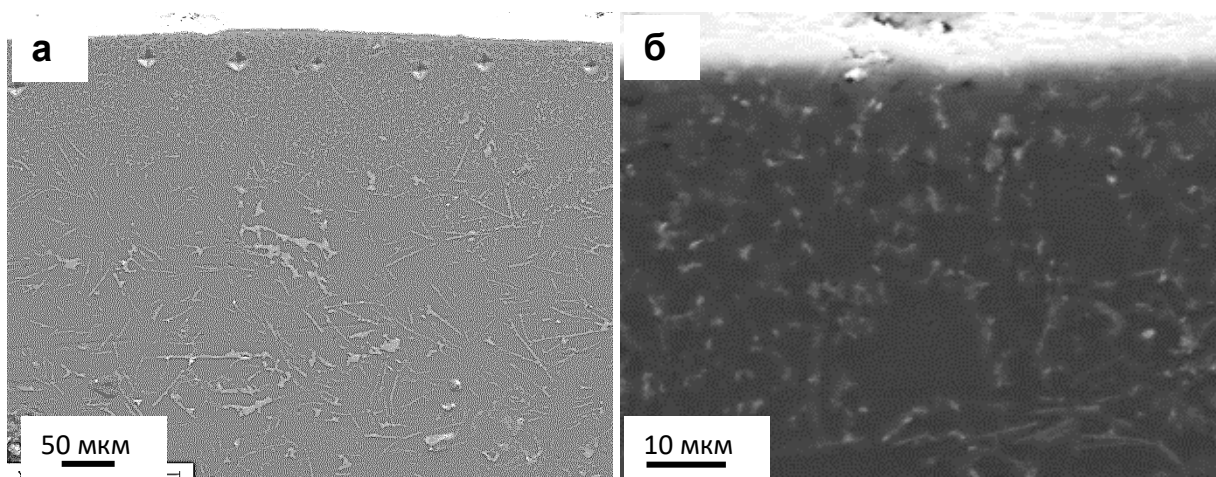


Рисунок 3.14 – Структура поперечного сечения образца заэвтектического силумина, подвергнутого поверхностному легированию путем облучения системы «пленка (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. Сканирующая электронная микроскопия

На рисунке 3.15 приведены результаты, полученные при микрорентгеноспектральном анализе поверхностного слоя образца заэвтектического силумина, легированного путем облучения системы

«пленка (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. Анализируя представленные результаты, можно отметить следующие факты. Во-первых, облучение системы пленка/подложка электронным пучком приводит к существенному снижению концентрации в поверхностном слое атомов циркония (сравни результаты, представленные в таблицах на рисунке 3.9 и рисунке 3.15). Это факт указывает на растворение пленки в силумине. Во-вторых, поверхностный слой характеризуется высокой концентрацией атомов кремния, более чем в два раза превышающей концентрацию кремния литого силумина. Этот факт может указывать на испарение с поверхности силумина при электронно-пучковой обработке образца атомов алюминия и, соответственно, существенном повышении в тонком поверхностном слое концентрации кремния. Подобный эффект наблюдался и при облучении силумина интенсивным импульсным электронным пучком (рисунок 3.6).

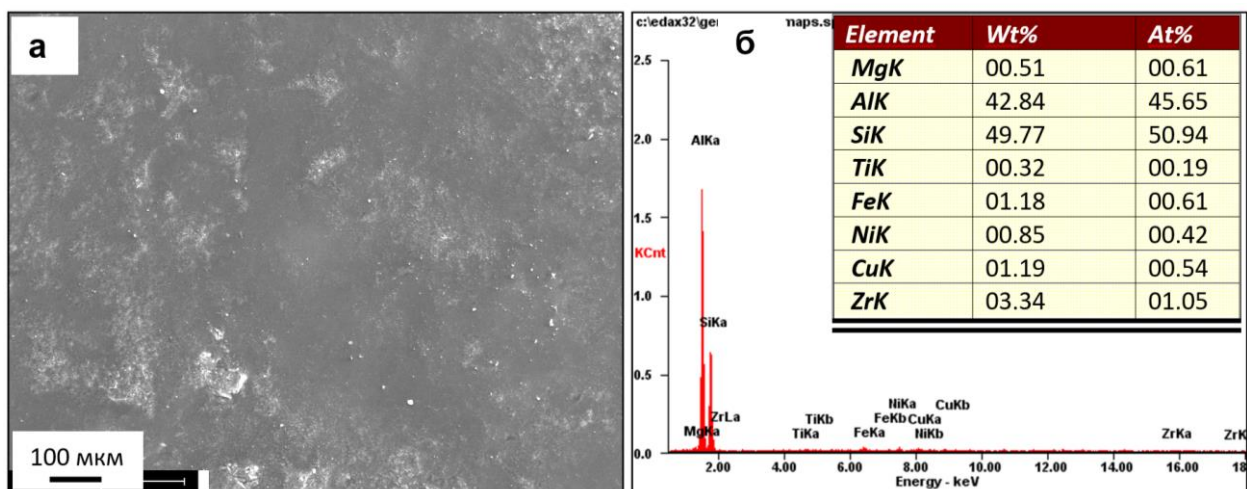


Рисунок 3.15 - Энергодисперсионный анализ системы «пленка- (Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком

Фазовый состав поверхностного слоя системы «пленка- (Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком, изучали методами рентгеноструктурного анализа. Участок рентгенограммы с образца силумина, подвергнутого

поверхностному легированию, представлен на рисунке 3.16. Анализ рентгенограммы показывает, что основными фазами поверхностного сплава являются алюминий и кремний (63,5%-Al, 32,1%-Si). Дополнительными фазами, образовавшимися в результате плавления системы пленка/подложка, являются $\text{Cu}_{9,1}\text{Al}_{31,2}\text{Si}_{0,78}$, $\text{Fe}_3\text{Al}_{0,5}\text{Si}_{0,5}$, Ti.

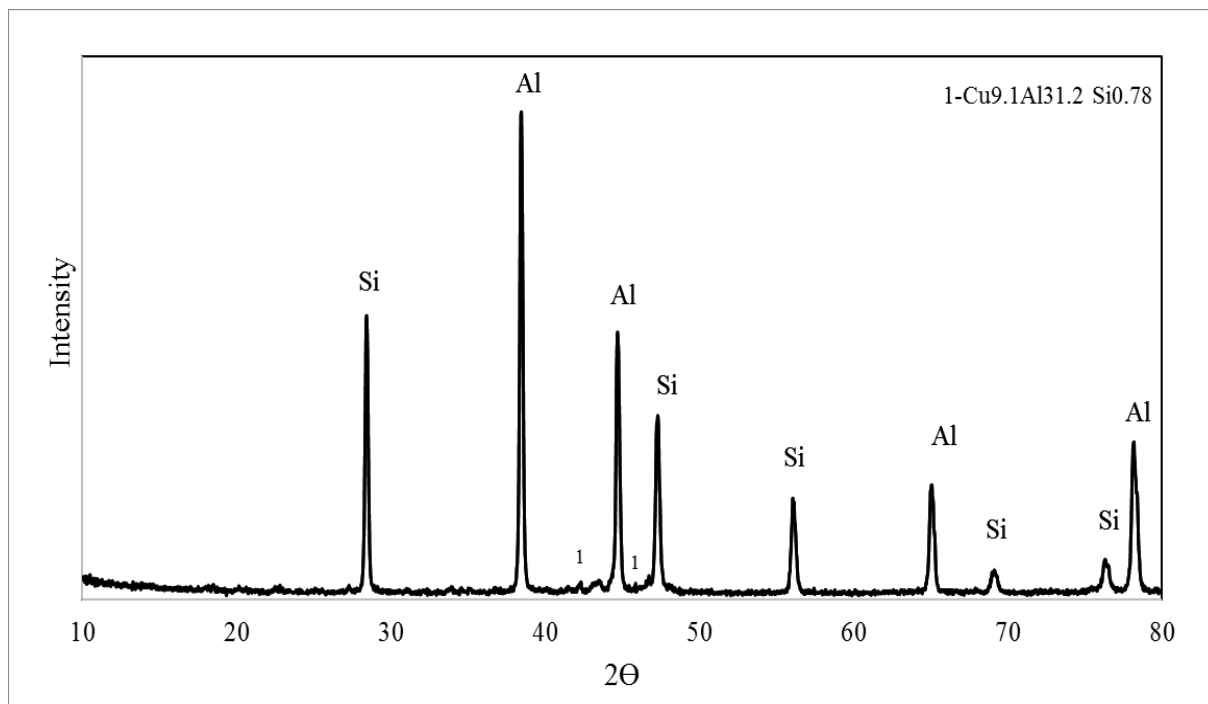


Рисунок 3.16 - Участок рентгенограммы поверхностного слоя системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком

Формирование поверхностного сплава при легировании заэвтектического силумина путем плавления системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком приводит к снижению микротвердости легированного слоя до 2060 МПа, т.е. в $\approx 1,7$ раза; коэффициент износа силумина равен $2,1 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н*м, что соответствует увеличению износостойкости в $\approx 2,6$ раза. Коэффициент трения материала составил 0,39, что в 1,1 раза меньше коэффициента трения литого силумина.

Таким образом, выполненные исследования структуры, элементного и фазового состава системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(22-24) вес. % Si)

подложка», облученной интенсивным импульсным электронным пучком, свидетельствуют о формировании поверхностного сплава, обладающего субмикро- и микрокристаллической многофазной структурой и характеризующегося высокими значениями износостойкости, в $\approx 2,6$ раза превышающими износостойкость заэвтектического силумина в литом состоянии.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа 4БМ5Б	ФИО Рыгиной Марии Евгеньевне
-----------------	---------------------------------

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

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

1. <i>Стоимость затрат научного исследования (НИ): на зарплаты, страховые отчисления, прочие и накладные расходы</i>	Итоговая стоимость затрат на НИ составит 184747,18 рублей. 35% от этой суммы составит отчисление заработной платы, 10% страховые и пенсионные отчисления. Страховые отчисления определяются Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ.
2. <i>Продолжительность выполнения НИ</i>	Оценка продолжительности выполнения НИ показала, что календарная продолжительность составит 110 дней.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка потенциала и перспективности реализации НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	SWOT-анализ позволил провести оценку потенциала и перспективности реализации научно-исследовательского проекта. Увидеть слабые и сильные стороны проекта, возможности и угрозы.
2. <i>Планирование и формирование графика работ по реализации НИ</i>	Построен график выполнения работ, рассчитана трудоемкость, как дипломника, так и руководителя.
3. <i>Формирование сметы</i>	В процессе формирования сметы НИ используется следующая группировка затрат по статьям: <ul style="list-style-type: none"> ✓ амортизация ✓ электроэнергия ✓ полная заработная плата исполнителей; ✓ отчисления во внебюджетные фонды; накладные расходы.

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 кафедры МЕН, НИИ ТПУ	Черепанова Н.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Рыгина Мария Евгеньевна		

Введение

В современном мире высокой конкуренции ценность научного исследования определяется коммерческой ценностью и конкурентоспособностью. Оценка коммерческой составляющей научного проекта-это востребованное условие при поиске людей, заинтересованных в инвестировании данной работы.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования [57].

1. Предпроектный анализ

Целевой рынок - высокотехнологические машиностроительные предприятия, на которых необходимо использовать подшипники, болты и другие детали, замена которых трудоемка. При модификации поверхности срок службы увеличивается в разы. Предполагаемые сегменты авиастроение, космостроение, судостроение таблица 4.1.

Таблица 4.1-Предполагаемые сегменты рынка

Направление д-ти		Авиастроение	Судостроение	Космостроение
Размер компании	Малая	3		
	Средняя	2	2	1,3
	Большая	2	3	2

Фирма 1- *SNR* – крупная французская компания

Фирма 2- *FAG*-крупная немецкая фирма

Фирма 3-*ОАО "МОСКОВСКИЙ ПОДШИПНИК"*-российская компания

Предполагается занять свободные сегменты рынка и вытеснить по механическим показателям и ценам уже существующих.

2. SWOT-анализ метода ионно-электронно-плазменного легирования

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) [58].

Цель этого метода определение сильных, слабых сторон данного метода, определение возможностей и угроз. Сам метод заключается в нанесении покрытий с последующим расплавлением поверхностного слоя, быстрым охлаждением образца. Матрица SWOT приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>S1. Уникальность метода</p> <p>S2. Квалифицированная команда.</p> <p>S3. Наличие оборудования и материалов для исследования</p> <p>S4. Получение высококачественных изделий</p> <p>S5. Малое время изготовления детали</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>W1. Сложное оборудование</p> <p>W2. Дороговизна процесса</p> <p>W3. Малая площадь обрабатываемой поверхности</p> <p>W4. Сложность подбора режима</p> <p>W5. Нет возможности поставить «на конвейер»</p>
<p>Возможности:</p> <p>O1. Использование инновационной инфраструктуры НИИ Со Ран.</p> <p>O2. Возможность получение грантов.</p> <p>O3. Появление дополнительного спроса на технологию.</p>	<p>O1S1S2S3S4</p> <p>O2 S1S2S3S4</p> <p>O3 S1S2S3S4S5</p>	<p>O1W5</p> <p>O2W2W4</p> <p>O3W1W4</p>
<p>Угрозы:</p> <p>T1. Отсутствие спроса на технологии производства</p> <p>T2. Ограничения на экспорт технологии.</p> <p>T3. Нехватка производственных мощностей, большое количество заказов</p> <p>T4. Возможный рост стоимости сырья</p> <p>T5. Не подбор режима облучения</p>	<p>T2 S1</p> <p>T3 S1S5</p> <p>T4S3</p> <p>T5 S1S4S5</p>	<p>T1W2W3W4</p> <p>T3W3W4W5</p> <p>T4W2</p> <p>T5W1W3W4W5</p>

Установка с помощью, которой это осуществляется и является первой в мире из двух. Таким образом, при планировании заказов необходимо понимать, что существует возможность осуществлять малосерийные частные заказы.

В таблице применяется следующая система сокращений:

S – сильные стороны; W – слабые стороны; O – возможности; T – угрозы.

После этого необходимо построить матрицу возможностей и угроз, позволяющую определить эффективность проекта. Выявить взаимосвязи сильных и слабых сторон проекта с возможностями и угрозами. Интерактивная таблица построена на основании таблицы 4.2, swot-анализа.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица возможностей

Возможности (O)	Сильные стороны проекта					
		S1	S2	S3	S4	S5
	O1	+	+	+	+	-
	O2	+	+	+	+	-
	O3	+	+	+	+	+
	Слабые стороны проекта					
		W1	W2	W3	W4	W5
	O1	-	-	-	-	+
	O2	-	+	-	+	-
O3	+	-	-	+	-	

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица угроз

Угрозы (T)	Сильные стороны проекта					
		S1	S2	S3	S4	S5
	T1	-	-	-	-	-
	T2	+	-	-	-	-
	T3	+	-	-	-	+
	T4	-	-	+	-	-
	T5	+	-	-	+	+
	Слабые стороны проекта					
		W1	W2	W3	W4	W5
	T1	-	+	+	+	-
	T2	-	-	-	-	-
T3	-	-	+	+	+	
T4	-	+	-	-	-	
T5	+	-	+	+	+	

На основе SWOT-анализа можно сделать выводы, что данное научное исследование обладает весомыми сильными сторонами: уникальность метода, получение высококачественных заготовок и образцов, малое время получения одной детали. К главным недостаткам же можно отнести сложность режима подбора или не существования режима для получения необходимых эксплуатационных, механических требований, малая величина обрабатываемой поверхности. Главной возможностью метода, применяемого в научном исследовании, является появление дополнительного спроса, а также получения грантов, за счет уникальности установки и метода. Также возможны значительные угрозы не подбор режима и в случае увеличения количества заказов, они не будут выполняться в срок, что повлечет за собой отток заказов.

4.1 Разработка графика проведения научно-исследовательского проекта

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости инновационной разработки. Поэтому необходимо определить трудоемкость работ каждого участника научного исследования.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i}, \quad (4.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.; $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.; $ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.1 Разработка графика выполнения научного исследования

Для удобства построения графика работ, необходимо построить диаграмму Ганта, представляющая из себя столбчатую диаграмму (гистограмму), которая используется для иллюстрации плана, графика работ по какому-либо проекту. Первый формат диаграммы был разработан Генри Л. Гантом в 1910 году.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого используется следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,478, \quad (4.4)$$

где $k_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году. В России в 2015-2014 годах было 118 праздничных и выходных дней.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.5.

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

На основе анализа составленной диаграммы Ганта можно сделать вывод, что продолжительность работ составляет 11 декад, начиная с первой декады марта и заканчивая второй декадой июня. Можно предположить, что объем работ, в ходе исследования, может быть увеличен или наоборот сокращен, в зависимости от полученных результатов.

Далее по диаграмме Ганта можно рассчитать время работы для каждого исполнителя. Занятость исполнителей представлена в таблице 4.7.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения научного исследования

Номер этапа	Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}
		t_{min} , чел.-дни	t_{max} , чел.-дни	$t_{\text{ож}}$, чел.-дни			
1	Составление ТЗ	3	5	3,8	1	3,8	3
2	Изучение литературы	12	20	15,2	1	15,2	30

9	Сдача проекта	Дипломник	2													
		Руководитель	2													

Далее по диаграмме Ганта можно рассчитать время работы для каждого исполнителя. Занятость исполнителей представлена в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Показатели рабочего времени исполнителей проекта

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней работы	19	101
Количество нерабочих дней за период выполнения проекта	6	30
Продолжительность выполнения проекта, в рабочих днях	13	71

Календарная продолжительность выполнения научного исследования составит 150 дней. Из них:

101 дней –занятость дипломника;19 дней –занятость руководителя;

Продолжительность выполнения проекта в рабочих днях составит 103 дня. Из них:

13 дней – продолжительность выполнения работ дипломником; 71 день – продолжительность выполнения работ руководителем.

4.3 Составление сметы научного исследования

Составление сметы научного исследования является необходимым условием. Она должна отражать все расходы, связанные с выполнением данного исследования. В процессе формирования бюджета НИ используется следующая группировка затрат по статьям:

1) амортизация;2) электроэнергия;3) полная заработная плата;4) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);5) накладные расходы.

4.3.1 Амортизация

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_{об} = (Ц \cdot F_{ф}) / (F_{н} \cdot F_{сс}) \quad (4.5)$$

где Ц – цена оборудования, руб.; F_H – номинальный фонд времени (рабочее время в году), ч; F_{cc} – срок службы оборудования, год; F_ϕ – фактическое время занятости оборудования, ч. $F_H = 250$ дней = 2000 ч.

Вычисленная амортизация оборудования представлена в таблице 4.8. Данные взяты на основе отчета лаборатории.

Основная статья амортизационных отчислений приходится на микровизор, в связи с его постоянным использованием.

Таблица 4.8-Амортизационные расчеты

Номер	Наименование оборудования	Ц, руб.	F_{cc} , год	F_ϕ , ч.	$Z_{об}$, руб.
1	Установка «Соло»	9 млн.	20	200	15547
2	Микротвердомер ПМТ-3	50000	10	1000	2530
3	Шлифовально-полировальный станок	230000	15	1000	7760
4	Компьютер	15000	5	500	750
5	Микровизор металлографический $\mu Vizo$ - MET-221P	270000	5	900	24595
Итого:					54182

4.3.2 Электроэнергия

Таблица 4.9-Затраты на электроэнергию

	Наименование оборудования	Цена, Ц, р.	N, кВт	n	$t_{зан.ч}$, ч.	Затраты, р.
1	Установка «Соло»	4,36	15	1	200	13080
2	Микротвердомер ПМТ-3	4,36	1	1	1000	4360
3	Шлифовально-полировальный станок	4,36	3	1	1000	13080
4	Компьютер	4,36	0,3	1	500	654
5	Микровизор металлографический $\mu Vizo$ - MET-221P	4,36	3	1	900	11772
Итого:						42946

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = \text{Ц} \cdot N \cdot n \cdot t_{зан.ч}, \quad (4.5)$$

где Ц — стоимость 1 кВт/ ч электроэнергии, руб; N — мощность оборудования, кВт; n — количество единиц оборудования одного вида, ед.; $t_{зан.ч}$ — время занятости оборудования, ч.;

Вычисленные затраты на электроэнергию представлены в таблице 4.9.

4.3.2 Полная заработная плата исполнителей темы

Заработная плата (оплата труда работника) — вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные выплаты и стимулирующие выплаты [59]. Или другими словами денежное поощрение труда работника.

Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

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

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

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

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

где $F_{\text{д}}$ — количество рабочих дней в месяце (26 при 6-дневной рабочей неделе, 22 при 5-дневной рабочей неделе), раб.дн.; $Z_{\text{тс}}$ — заработная плата по тарифной ставке, руб.; $Z_{\text{допл}}$ — доплаты и надбавки, руб.; $Z_{\text{рк}}$ — районная доплата, руб. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$Z_{\text{допл}}$, руб.	$Z_{\text{рк}}$, руб.	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	15000	2500	4500	22000	1000	13	13000
Дипломник	8000	3600	2400	14000	636,4	71	45181,5
Итого $Z_{\text{осн}}$, руб.							58181,5

Расчет дополнительной заработной платы, размер которой составляет 12 – 15% от основной, представлен в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – 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	13000	1950	14950
Дипломник	0,12	45181,5	5421,78	50603,28
Итого $Z_{\text{осн, руб.}}$		58181,5	7371,78	65553,28

4.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В соответствии с законодательством Российской Федерации обязательными являются отчисления в фонды: пенсионные, социального и медицинского страхования.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

В 2017 г. в соответствии с Федеральным законом установлен размер страховых взносов равный 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (13000 + 1950) = 4051,45$ рублей для научного руководителя;

$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (45181,5 + 5421,78) = 13713,5$ рублей для дипломника.

4.3.5 Накладные расходы

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

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

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

Таким образом, величина равняется 2400 рублей

4.3.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Еще на этапе планирования проекта должна быть составлена смета затрат. Это станет основой для формирования договора с заказчиком и является минимальным в рамках данного исследования.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Смета научного исследования

Наименование статьи	Сумма, руб.	Доля, %
1. Амортизационные расчеты	54182	29,3
2. Электроэнергия	42946	23,2
3. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	65553,28	35,5
4. Отчисления во внебюджетные фонды	19665,9	10,7
5. Накладные расходы	2400	1,3
6. Бюджет затрат НИ	184747,18	100

Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию научно-исследовательского проекта составят 184,75 тысяч рублей, из которых, приблизительно, одна треть (35,2%) составят затраты на заработную плату.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ5Б	Рыгиной Марии Евгеньевне

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Закрытое помещение, офисного типа, с комбинированным освещением: естественным и искусственным. В помещении располагается оборудование: ПК, шлифовально-полировальный станок, металлографический микровизор, микротвердомер, установка для напыления и вплавления покрытий. И сопутствующий инвентарь для работы и обслуживания приборов. Возможно возникновение ионизирующих излучений в случае нарушения целостности конструкции установки. В случае нарушения процессов утилизации металлической стружки возможно попадания в водосточные трубы и систему водоснабжения, при этом будет происходить загрязнение литосферы, гидросферы. ЧС возможна в случае нарушения целостности конструкции при возникновении наводнений. Возможен пожар при грозах и перепадах напряжений.</p>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 2. СНИП 23-03-2003 3. МУК 4.3.2756-10 4. РД 153-34.0-03.292-00 5. ГОСТ Р 12.1.019-2009 6. ГН 2.1.5.2280-07 7. ГОСТ 12.2.032-78 8. ГОСТ Р 12.4.026-2001 9. Приказ президента от 24 января 2014 года № 33 н 10. ТК РФ 11. КоАП РФ 12. ТР ТС 019/2011. 13. ГОСТ Р 22.8-05-99 14. Тои Р-45-068-97
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – 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) 	<p>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 зоны металлов, в виде пыли с разным размером частиц, необходимо снабжать сотрудников средствами индивидуальной защиты, так как наибольшая концентрация в области работ, она не превышает ПДК, таким образом нет необходимости в принятии дополнительных мер защиты: респираторов, халатов, перчаток.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита– источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>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.</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>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.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	<p>Разработан ряд действий в случае возникновения возгорания, взрыва и других чрезвычайных ситуаций. Каждый сотрудник обязан проходить инструктаж.</p>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	<p>Рабочая зона скомпонована в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78. Конструкция рабочего места обеспечивает выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Высота сидения 420 мм., высота поверхности рабочего места 725 мм. Монитор ПК расположен под углом +15 градусов от нормали, что обеспечивает максимальную скорость считывания информации. Тип работ не требует особых ограничений.</p>

Перечень графического материала:

При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ	Раденков Тимофей Александрович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Рыгина Мария Евгеньевна		

Введение

В данной магистерской диссертации рассматривается вопрос о модификации заэвтектического силумина различными методами: электронным пучком, ионно-плазменным напылением с последующей модификацией высокоинтенсивным электронным пучком. В ходе всего исследования образцы подготавливаются с помощью шлифовально-полировального станка «Полилаб» к легированию на установке «Трио», а затем облучению на установке «Соло», после чего поступают обратно в лабораторию, где исследуются с помощью металлографического микроскопа «Микровизор μ Vizo - MET-221», сканирующего электронного микроскопа «SEM-515 Philips», рентгеновского дифрактометра «XRD 6000»; микротвердомера ПМТ-3 и трибометра TRIBOtechnic.

Лаборатория оборудована отдельными рабочими местами для всех сотрудников и студентов, с предоставлением средств индивидуальной защиты. В лаборатории присутствует как искусственное освещение, так и естественное.

1. Техногенная безопасность

1. Основными факторами, влияющими на персонал, находящийся в лаборатории являются: освещение, вредные вещества и косвенно электромагнитные воздействия, вызванные работой с компьютером и другим оборудованием. Работники не подвержены метеоусловиям и ионизирующему излучению.

Для определения безопасности выполняемых работ необходимо определить возможные вредные и опасные факторы, микроклимат рабочего места, а также степень освещенности. Вид работы, выполняемой относится к легкой, включает в себя подготовку образцов на шлифовально-полировальном станке и последующее их изучение на микротвердометре и микроскопе с возможностью фотографии.

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	Движущие детали машин и механизмов
Работа за микротвердометром	Монотонность труда, перенапряжение анализаторов (глаза)	-
Работа за микроскопом с возможностью фотографии	Монотонность труда, перенапряжение анализаторов (глаза)	-

2. На данном предприятии возможно возникновение пожаров, аварий, связанных с неконтролируемым импульсным воздействием ионов, электронов и сопутствующих излучений. Необходимо предпринять превентивные меры в случае возможных пробоев в корпусе установок для нанесения и сплавления покрытий. И обеспечить наличие огнетушителей, сигнализации и планов эвакуации.

Возможно возникновение взрывов при неправильной эксплуатации газового баллона.

3. При неправильной утилизации металлической стружки возможно проникновение в сточные воды и загрязнение окружающей среды.

4. Чрезвычайные ситуации любого характера приводят к порче оборудования, так же возникает возможность попадания металлов в среду в виде кусков, стружки и частиц. Так же в случае нарушения целостности установок для нанесения или вплавления покрытия в подложку возможно превышение уровня радиации. Возможно так же взрыв газовых баллонов, который может привести к возгоранию.

2. Знакомство и выборка необходимых документов

1. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
2. СНИП 23-03-2003
3. МУК 4.3.2756-10
4. РД 153-34.0-03.292-00
5. ГОСТ Р 12.1.019-2009
6. ГН 2.1.5.2280-07
7. ГОСТ 12.2.032-78
8. ГОСТ Р 12.4.026-2001
9. Приказ президента от 24 января 2014 года № 33 н
10. ТК РФ
11. КоАП РФ
12. ТР ТС 019/2011.
13. ГОСТ Р 22.8-05-99
14. Тои Р-45-068-97

При рассмотрении данного типа производства были рассмотрены вышеприведенные типы документов, которые полностью охватывают тип производства. Особое внимание следует уделить правилам работы за компьютерами и правилами оборудования рабочего места, так как анализ результатов занимает большую часть времени.

3. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

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 [60].

Таблица 5.2-ПДК веществ, присутствующих в воздухе рабочей зоны [60]

Вещество	ПДК, мг/м ³	Воздействие на организм
Титан	10	Механическое повреждение тканей
Алюминий	2	Механическое повреждение тканей
Диоксид титана	10	Механическое повреждение тканей
Диоксид алюминия	2	Механическое повреждение тканей
Диоксид кремния	2	Фиброгенное воздействие
Силумин	2	Механическое повреждение тканей
Диоксид циркония	6	Фиброгенное воздействие
Цирконий	6	Механическое повреждение тканей
Медь	1	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.

Освещение

Свет представляет собой видимые глазом электромагнитные волны оптического диапазона длиной 380—760 нм (1 нм нанометр — 10^{-9} м), воспринимаемые сетчатой оболочкой зрительного анализатора. Недостаточное освещение рабочего места затрудняет выполнение работы, вызывает утомление, увеличивает риск производственного травматизма. Длительное пребывание в условиях недостаточного освещения сопровождается снижением интенсивности обмена веществ в организме, ослаблением его реактивности, способствует развитию близорукости. К

таким же последствиям приводит работа при ограниченном спектральном составе света и монотонном режиме освещения. Излишне яркий свет слепит, снижает зрительные функции, приводит к перевозбуждению нервной системы, уменьшает работоспособность, а при чрезмерной яркости может вызвать фотоожоги глаз и кожи, катаракты; и другие нарушения зрения [61].

На данном производстве необходимо обеспечить комбинированное освещение. Особое внимание необходимо обеспечить аналитической и тестовой лабораторий. Так как именно от данного этапа производства зависит дальнейшее развитие предприятие и в будущем надежность конструкций. При снижении надежности возможно возникновение ЧС техногенного характера.

Таблица 5.3- Освещенность и ее параметры [61]

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

При выборе ламп необходимо отдавать предпочтение лампам с незначительным коэффициентом пульсации. В настоящее время пульсация является минимальной или вообще отсутствует у светодиодных ламп. Именно им сейчас отдается наибольшее предпочтение.

Уровень шума

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

Согласно СНИП 23-03-2003 [62] допустимые значения для производства и административно-управленческого персонала уровни шума приведены в таблице 5.4. Шум на предприятии характеризуется как

временный прерывистый. Обычно установка для полировально-шлифовальных работ не превышает 60 дБА, но при износе оборудования возможно его превышение. Сотрудникам необходимо выдавать наушники, так как работа в условиях шума оказывает отрицательное воздействие на сотрудников снижая производительность.

Таблица 5.4-Допустимые уровни шума [62]

Тип помещения	Время суток	Максимальный уровень звука, дБА
Производственное помещение	-	80
Аналитическая лаборатория	-	70

Микроклимат

При длительном и систематическом пребывании человека в оптимальных микроклиматических условиях сохраняется нормальное функциональное и тепловое состояние организма без напряжения механизмов терморегуляции. При этом ощущается тепловой комфорт (состояние удовлетворения внешней средой), обеспечивается высокий уровень работоспособности. Такие условия предпочтительны на рабочих местах. Возможно для определенных групп людей воздух в производственных помещениях может оказывать отрицательное воздействие на кожные покровы. Поэтому в случае возникновения таких инцидентов для обеспечения безопасности и повышения уровня контроля влажность рекомендуется повысить до максимальных допустимых значений.

Микроклимат рабочей зоны так же соответствует необходимым требованиям, которые представлены в таблице 5.5, составленной на основании МУК 4.3.2756-10 [63]:

Таблица 5.5- Условия микроклимата [63]

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура, С ⁰		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/сек	
		Фактич. значение	Допустим. значение	Фактич. значение	Допустим. значение	Фактич. значение	Допустим. значение
Холодный	Легкая (16)	20	19-24	50	15-75	0,1	0,1-0,2
Теплый	Легкая (16)	24	20-28	50	15-75	0,2	0,1-0,3

4. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производённой среды

Таблица 5.6-Опасные факторы производственной среды

Класс воздействия	Источники	СЗ	Причина
Механическая	Шлифовально-полировальная установка	Очки, перчатки, респиратор, халат	Неправильная эксплуатация
Электромагнитные воздействия	Установки, ПК	Нейтрализаторы электрических полей	Несоблюдение ежима труда и отдыха
Электробезопасность	Установки, проводка	Изолирующие штанги всех видов; заземление зануление, изолирующие клещи; указатели напряжения	Неправильная эксплуатация, Неисправность электрических сетей, перегрузка сети
Пожаровзрывобезопасность	Газовый баллон, КЗ электрических сетей	Огнетушители, пожарная сигнализация	Неправильная эксплуатация

а) Механическая опасность в основном касается работы на шлифовально-полировальном станке, необходимо соблюдать технику безопасности и допускать обученный персонал. При несоблюдении возможна порча оборудования, продукции или причинение вреда здоровью работника. Так же работникам необходимо выдавать ИСЗ: маска, халат, перчатки силиконовые.

На рабочем месте при выполнении работ с шлифовально-полировальным оборудованием необходимо соблюдать правила техники безопасности в соответствии с РД 153-34.0-03.292-00 [64].

Б) *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 [65]. То есть работа не должна превышать 2 часа без перерыва и перерыв 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 учитывать, что все оборудование в лаборатории является электрическим, что неизбежно ведет к необходимости соблюдения ГОСТ Р 12.1.019-2009 [66]:

Технические способы и средства защиты, обеспечивающие электробезопасность, должны устанавливаться с учетом особенностей электрической системы, внешних условий и прочих факторов.

При возникновении пожаров каждый работник должен позвонить в службу спасения, дать сигнал тревоги.

Должностное лицо должно еще раз позвонить в службу спасения и обеспечить эвакуацию, предварительно прекратив все работы в здании.

Для обеспечения защиты персонала в случае возникновения пожара, необходимо обеспечить наличие противопожарных средств и огнетушителей, к которым у работников будет открытый доступ [67].

Электрозащитное средство — средство защиты от поражения электрическим током, предназначенное для обеспечения электробезопасности.

- диэлектрические перчатки, галоши, боты;
- диэлектрические ковры и изолирующие подставки;
- защитные ограждения (щиты и ширмы);

Перед началом работ каждый работник должен пройти инструктаж и пройти необходимое тестирование для повышения ответственности каждого работника.

5. Охрана окружающей среды

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 превентивные меры по минимизации или полному исключению загрязнения окружающей среды. Материалы могут всплывать, и оставаться в воздухе, вследствие этого они могут перемещаться воздушными потоками за пределы лаборатории, осаждаюсь загрязнять литосферу, проникать в подземные и наземные воды, выноситься из лаборатории пассивно 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.

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 [68] 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.

Что касается защиты селитебной зоны, необходимо обеспечить размещение установки для напыления и облучения в помещении с толстыми

железобетонными стенами. И создать экранирование на случай ЧС в виде свинцовых пластин. Необходимо вынести данное производство за город на 1,5 км от жилых домов.

6. 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 вплавления 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.

7. Особенности законодательного регулирования проектных решений

Согласно трудовому законодательству РФ работодатель обязан обеспечить безопасность своих сотрудников, а, следовательно, предоставлять средства индивидуальной защиты, прошедших государственную сертификацию или декларирование в соответствии с законодательством РФ. Обеспечить соблюдение режима труда и отдыха. Так же необходимо обеспечить санитарно-бытовое обслуживание и медицинское обеспечение работников, и доставку работников, заболевших на рабочем месте, в медицинскую организацию в случае необходимости оказания им неотложной помощи. Тип работы является легкий, что не требует определенных условий по продолжительности рабочего дня, что не должно противоречить трудовому кодексу. К работе могут быть допущены женщины, так же беременные с обязательным применением средств защиты.

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 халаты, 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 %.

Средства индивидуальной защиты рук следует использовать на каждой стадии работы с наноматериалами. В исследовательских

лабораториях проводятся работы с малых количеством наночастиц. Такая работа требует повышенной чувствительности пальцев рук, поэтому следует пользоваться плотно облегающими руку перчатками. Для этих целей подходят перчатки класса ПМ (для защиты от мелкодисперсной пыли).

Каждый работник обязан использовать вышеперечисленные средства индивидуальной защиты, а также контролировать использование их другими сотрудниками. Так как нельзя умалять пользу от общественного контроля за надлежащим выполнением техник безопасности.

Все работники подлежат обязательному пенсионному обеспечению. Для решения вопросов о чрезвычайных ситуациях, создана комиссия, которая занимается финансовыми, продовольственными, медицинскими и информационными проблемами, связанными с возникновением чрезвычайной ситуации. При возникновении чрезвычайных ситуаций предусмотрено место сбора Штаб ГО ЧС.

Поскольку большинство работ по исследованию материала, таких как измерение твердости, получение изображений по средствам оптического микроскопа, обработка данных производятся в сидячем положении, нужно создать эргономические 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). ГОСТ 12.2.032-78 [69].

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 также красным цветом нужно обозначить внутренние поверхности крышек шкафов с открытыми токоведущими элементами оборудования, если таковые располагаются в лаборатории согласно ГОСТ Р 12.4.026-2001 [70].

Вид производимых работ можно отнести к монотонным, из-за частого повторения одних и тех же манипуляций, но класс работы 1 (оптимальный), так как по времени активная работа не превышает 75% от всех выполняемых работ согласно приказа президента от 24 января 2014 года № 33 н.

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. Если в исследованиях задействуются кормящие женщины, в силу неопасности производимых работ, в частности, работы за микроскопом, микротвердомером, им должен быть предоставлен перерыв для кормления ребенка или детей согласно ст. 264 ТК РФ. Оплата в данном случае производится. Кроме вышеперечисленных перерывов могут предоставляться перерывы, предусмотренные при работе с компьютерами и видеодисплеями. За несоблюдение вышеперечисленного работодателю грозит штраф размером от 1000 до 50000 тысяч рублей согласно ст. 5.27 КоАП РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что силумин заэвтектического состава с концентрацией кремния (22-24) вес. % в литом состоянии характеризуется наличием грубых кристаллов первичного кремния и интерметаллидов;

2. Выявлено, что обработка силумина интенсивным импульсным электронным пучком в режиме высокоскоростного плавления поверхностного слоя сопровождается формированием в поверхностном слое толщиной ≈ 100 мкм структуры с квазиравномерным распределением атомов кремния и примесных элементов. Модифицирование структуры силумина сопровождается увеличением микротвердости поверхностного слоя в $\approx 1,7$ раза, а износостойкости в $\approx 1,2$ раза;

3. Показано, что при электродуговом распылении катода состава Zr-5%Ti-5%Cu на поверхности силумина формируется пленка, представленная элементами распыляемого катода. Пленка содержит большое количество микрокапель, обогащенных атомами циркония;

4. Выявлены режимы облучения системы пленка / подложка интенсивным импульсным электронным пучком, позволяющие вплавлять пленку в подложку, либо растворять пленку в поверхностном слое подложки;

5. Установлено, что в результате обработки системы «пленка ((Zr-5%Ti-5%Cu) / (Al-(20-22) вес. % Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком в поверхностном слое силумина заэвтектического состава сформируется поверхностный сплав, обладающий субмикромикроструктурной многофазной структурой, характеризующийся высокими значениями износостойкости, в $\approx 2,6$ раза превышающими износостойкость заэвтектического силумина в литом состоянии.

Таким образом, выполненные в работе исследования выявили эффективность разрабатываемого метода электронно-ионно-плазменного модифицирования, позволяющего, осуществляя облучение материала интенсивным импульсным электронным пучком или формируя

поверхностный сплав (т.е. осуществляя экономное легирование), существенно увеличивать прочностные и трибологические свойства поверхностного слоя силумина заэвтектического состава.

Список публикаций

1. Ivanov Y.F., Gracheva M.E., Petrikova E.A., Krysina O.V., Teresov A.D., Ivanova O.V., Ikonnikova I.A. Electron-Ion Plasma Modification of Al-based Alloys // AIP Conference Proceedings. - 2016 - Vol. 1698, Article number 030012. - p. 1-8
2. Ivanov Y. F., Krysina O.V., Petrikova E.A., Ivanova O.V., Ikonnikova I.A., Gracheva M.E. Numerical Simulation of Thermal Processes Involved in Surface Alloying of Aluminum with Titanium by an Intense Pulsed Electron Beam // Key Engineering Materials . - 2016 - Vol. 683. - p. 569-575
3. Ivanov Y.F., Petrikova E.A., Teresov A.D., Krysina O.V., Gracheva M.E. Formation of the surface alloys by high-intensity pulsed electron beam irradiation of the coating/substrate system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2015 - Vol. 81, Article number 012039. - p. 1-6
4. Рыгина (Грачева) М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Шугуров В.В., Иванов Ю.Ф. Структура и свойства заэвтектического силумина, подвергнутого легированию при обработке системы пленка/подложка интенсивным импульсным электронным пучком // Роль технических наук в развитии общества: сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Кемерово, 28 Февраля 2017. - Кемерово: ЗапСибНЦ, 2017 - С. 104-107
5. Рыгина (Грачева) М.Е. Модификация эвтектического силумина интенсивным электронным пучком // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы: материалы III Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 22-25 Ноября 2016. - Томск: ТГАСУ, 2016 - С. 423-426
6. Рыгина (Грачева) М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д. Свойства и структура заэвтектического силумина, обработанного интенсивным импульсным электронным пучком // Высокие технологии в современной науке и технике: сборник трудов V Международной научно-технической

конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 5-7 Декабря 2016. - Томск: STT, 2016 - С. 164-165

7. Рыгина (Грачева) М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д. Структура, формирующаяся при обработке поверхности заэвтектического силумина (Al-(20-22%) Si) высокоинтенсивным электронным пучком [Электронный ресурс] // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 26-29 Апреля 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1. Физика - С. 259-261 - http://science-persp.tpu.ru/Arch/Proceedings_2016_vol_1.pdf

8. Рыгина (Грачева) М.Е., Асташинская М.В., Черенда Н.Н., Иванов Ю.Ф. Модификация поверхности заэвтектического силумина интенсивным электронным пучком [Электронный ресурс] // Наука молодых: сборник материалов международной научной конференции, Москва, 19-20 Ноября 2015. - Москва: РусАльянс Сова, 2016 - С. 159-164 - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

9. Рыгина (Грачева) М.Е., Крысина О.В., Тересов А.Д., Иванов Ю.Ф. Оптимизация процессов легирования силумина ионно-электронно-плазменным методом // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи, Томск, 9-11 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 120-123

10. Рыгина (Грачева) М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д. Модификация заэвтектического силумина (Al-20-22% Si) интенсивным электронным пучком // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов: в 9 т., Новосибирск, 5-9 Декабря 2016. - Новосибирск: НГТУ, 2016 - Т. 3 - С. 183-184

11. Рыгина (Грачева) М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д. Модифицирование приповерхностного слоя заэвтектического силумина электронно-пучковым методом // Физика твердого тела: сборник материалов

XV Российской научной студенческой конференции, Томск, 18-20 Мая 2016.

- Томск: ТГУ, 2016 - С. 78-80

12. Рыгина (Грачева) М.Е., Иванов Ю.Ф., Асташинская М.В., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Черенда Н.Н., Углов В.В., Ласковнев А.П. Структура, формирующаяся при обработке поверхности заэвтектического силумина высокоинтенсивным электронным пучком // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии: материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых, Томск, 11-13 Мая 2016. - Томск: ИОА СО РАН, 2016 - С. 46-50

Список используемых источников

1. Машков Ю.К., Полещенко К.Н., Поворознюк С.Н., Орлов П.В. Трение и модифицирование материалов трибосистем. – М.: Наука, 2000. –280 с.
2. Белов, Н. А. Фазовый состав и структура силуминов / Н.А. Белов, С.В.Савченко, А.В. Хван. - М.: МИСИС, 2008. 282 с.
3. Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Ме-таллургия, 1977. 272 с.
4. Золоторевский В. С., Белов Н. А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСИС, 2005. 376 с.
5. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структур и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой.-Минск: Белорусская наука.-2013г.-287 с.
6. S. Nehr Korn et al. A hardness–microstructure correlation study of anodised powder-metallurgical Al–Cu alloy composites/ Surface & Coatings Technology 242 (2014) 118–124
7. K. Soorya Prakash et al. Effect of reinforcement, compact pressure and hard ceramic coating on aluminum rock dust composite performance/ Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 54 (2016) 223–229
8. B.N. Sarada et al. Hardness and wear characteristics of hybrid aluminum metal matrix composites produced by stir casting technique/ Materials Today: Proceedings 2 (2015) 2878 – 2885
9. Vivek Gopi et al. Measurement of hardness, wear rate and coefficient of friction of surface refined Al-Cu alloy/ Procedia Engineering 97 (2014) 1355 – 1360
10. A.R. Farkoosh et al. Dispersoid strengthening of a high temperature Al–Si–Cu–Mg alloy via Mo addition / Materials Science & Engineering A 620 (2015) 181–189
11. J. Qian et al. Structure, micro-hardness and corrosion behavior of the AlSi/Al₂O₃ coatings prepared by laser plasma hybrid spraying on magnesium alloy/ Vacuum 117 (2015) 55e59

12. Z. Lijing et al. Selective laser melting of Al–8.5Fe–1.3V–1.7Si alloy: Investigation on the resultant microstructure and hardness / Chinese Journal of Aeronautics, (2015),28(2): 564–569
13. J. Borowski, K. Bartkowiak Investigation of the influence of laser treatment parameters on the properties of the surface layer of aluminum alloys/ Physics Procedia 5 (2010) 449–456
14. R.S. Rajamure et al. Laser surface alloying of molybdenum on aluminum for enhanced wear resistance/ Surface & Coatings Technology 258 (2014) 337–342
15. Muzaffer ZEREN, et al Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys/Trans. Nonferrous Met. Soc. China 21(2011) 1698-1702
16. D. Ueyama et al. Hardness modification of Al–Mg–Si alloy by using energetic ion beam irradiation/ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 351 (2015) 1–5
17. Комаров А.И., Комарова В.И. Структура и триботехнические свойства силумина АК12М2МгН, модифицированного синтезированными in-situ наполнителями с наноразмерными составляющими. Поликомтриб.-2015
18. Федотов М.В., и др. Исследование влияния состава на структуру заэвтектических борсодержащих лигатурных сплавов. СГИУ.-с. 231-233
19. Гарибян Г.С., Расщупкин В.П. Влияние фосфидов на структуру и свойства заэвтектических силуминов. Машиностроение и машиноведение. Омский научный известник.-№2.-2010
20. Чибинова Ю.В. Изотов В.А. Способ модифицирования алюминия и алюминиево-кремниевых сплавов (силуминов) углеродом (RU 2538850)
21. Богданова Т.А., Довженко Н.Н. Способы модифицирования силуминов комплексным флюсом COVERAL MTS1582 производства FOSECO. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 5 (2015 8) 594-600
22. Комаров А.И. Объемно модифицированное карбидом титана оксидное керамическое покрытие на эвтектическом силумине: получение, структурно-

фазовое состояние, свойства. Механика машин, механизмов и материалов.-
2016.-№ 1 (34)

23. Алюминий и его сплавы. Влияние кремния на силумины [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://cdn-as3.myvirtualpaper.com/s/soedinitel/aliegosplavy/2011053101/upload/aliegosplavy.pdf>

24. Монфольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов.-
М.:Металлургия.-1979

25. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов.-
М.:Металлургия.-1978

26. Боом Е.А. Природа модифицирования сплавов типа силумин.-
М:Металлургия.-1964

27. Альтман М.Б. Металлургия литейных алюминиевых сплавов.-М.
Металлургия.-1972

28. Галактионова Н.А. Водород в металлах\Пер.с нем..-М. Металлургия.-1980

29. Фромм Е., Гебхардт Е. Газы и углерод в металлах\Пер. с нем.-М.-
Металлургия.-1980

30. Wang Yinxiao. Formation of metallic glasses near intermetallic in Zr-Cu and Zr-Cu-Ti systems. A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy department of materials science & engineering national university of singapore.-
2012

31. Woychik C.G.,Massalski T.B., Z. Metallk. 1988; 79, 149-153.

32. Arroyave R., Eagar T.W.,Kaufman L., J. Alloy. Compd. 2003; 351, 158-170

33. Johnson W.L., MRS Bull. 1999; 24, 42-56.

Марков Ю.М., Амосов Е.А. Коэффициент наследственности в силуминах. -
«Современные инновации в науке и техники.-2014.-с.65-68

34. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Баранов К.Н. Влияние охлаждения отливок из заэвтектического силумина на их структуру при вертикальном центробежном литье. Вести национальной академии наук Беларуси.-№4.-
2013

35. Мазур В.И., Капустников С.В., и др. Структурообразование сложнолегированных заэвтектических силуминах при центробежном литье. Структуроутворення. Опір руйнуванню та фізико-механічні властивості.- 2013
36. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов./М.В. Мальцев. - М: Металлургия. - 1960г.- 214 с.
37. Добаткин В.И. Слитки алюминиевых сплавов. - М: Металлургиздат.- 1960г.-175 с.
38. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. - М:Металлургия.-1975г.-248 с.
39. Мошняков М.Г., Быкова Н.В. Физическое моделирование упрочнения алюминиевого сплава Д16 // 16 Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. статей. - Самара.-с192-194.
40. Сипунов С. В. Материаловедение. - М: Лань.- 2015. – 202 с.
41. Рыжонков Д. И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы.- М:Бином.-2012г-368 с.
42. Электронный источник. Режим доступа: <http://delta-grup.ru/bibliot/36/5.htm>
43. Новое в технологии получения материалов/под ред. Ю.А. Осипяна и А. Хауфа. - М:Машиностроение.-1990-448с.
45. Коваленко В.С. Прогрессивные методы лазерной обработки материалов/В.С. Коваленко. - Киев: Вища школа.-1985.-243с.
46. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. - М: Машиностроение. - 1989-480с
47. Миркин Л.И. Физические основы обработки материалов лучами лазера.- М:Изд-во МГУ.-1975-383с
48. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками /под ред. Дж. Поута, Г. Фоти и Д. Джекобсона. - М.: Машиностроение. - 1987. - 424 с

49. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник/ Рыкалина Н.Н., Углова А.А. Зуева Н.В., Кокора А.Н.-М.:Машиностроение.-1985-486с.
50. Гнусов С.Ф. Электронный луч в формировании неравновесных структур.-Томск: Изд-во ТПУ.-2012-115с
51. Будкер Г.И., Салимов Р.А. и др. Ускоритель заряженных частиц. Авторское свидетельство №589698
52. Интернет ресурс. Режим доступа: <http://engineeringssystem.ru/procesi-proizvodstva-chernih-i-cvetnih-metaliv-i-ih-splavov/elektronno-luchevaya-obrabotka.php>.
53. Ivanov Yu. F., Koval N. N., Vlasov V. I., Teresov A. D., Petrikova E. A., Shugurov V. V., Ivanova O. V., Ikonnikova I. A., Klopotov A. A. The structure of the surface alloy formed as a result of high-speed melting of the film (TiCu)/substrate (Al) system // High Temperature Material Processes. 2013. V. 17(4). P. 241–256.
54. Ivanov Yu F, Petrikova E A, Ivanova O V, Ikonnikova I A, Tereso A.D., Shugurov V V, Krysinina O V. Structure and properties of a coating (TiCuN) – substrate (A7) system modified with a high-intensity electron beam// Russian Physics Journal. 2015. V.58. Issue 3. P. 373-379.
55. Иванов Ю.Ф., Петрикова Е. А., Иванова О.В., Иконникова И. А., Ткаченко А.В. Численное моделирование температурного поля силумина, облученного интенсивным электронным пучком //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – №4. С. – 46-51.
56. Коваль, Н. Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия вузов. Физика. -2008. - Т. 51. - № 5. - С. 60-70.
57. Видяев И.Г., Серикова Г.Н. Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. - Томск:Изд-во ТПУ.-2014.-36с.

58. Котлер Ф., Бергер Р., Бикхофф Н. Стратегический менеджмент по Котлеру. Лучшие примеры и методы. - Альпина Паблишер.-2012.-143 с.
59. Интернет ресурс. Режим доступа: Интернет ресурс. Режим доступа: <http://www.zakonrf.info/tk/129>, свободный, свободный.
60. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. - Введ.2003-05-19.-М: Стандартиформ.-20 с.
61. ГОСТ Р 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. - Введ. 2013-11-08.-М:Стандартиформ.-2013.-28 с.
62. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. - Введ. 2003-06-30.-М: Стандартиформ. - 40 с.
63. МУК 4.3.2756-10. Методические указания по измерению и оценке микроклимата производственных помещений.-2010-11-12.-М: Стандартиформ. - 2010.-20 с.
64. Типовая инструкция по охране труда при работе на шлифовальных станках РД 153-34.0-03.292-00.- М:НЦ ЭНАС».-2002.
65. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.-Москва.-2003
66. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.-М: Стандартиформ.-2009
67. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1). - 1987-12-01. - М: Стандартиформ.-1982
68. ГН 2.1.5.2280-07. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Дополнения и изменения N 1 к ГН 2.1.5.1315-03.-2007
69. ГОСТ 12.2.032-78.ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.- М.: Изд-во стандартов.-1986.

70. ГОСТ Р 12.4.026-2001. Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний.-М:Госстандарт России.-2001

Приложение А Results of the research and their discussion

Раздел (3) Результаты и их обсуждение

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ5Б	Рыгина Мария Евгеньевна		

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	Квашнина Ольга Сергеевна			

3. RESULTS OF THE RESEARCH AND THEIR DISCUSSION

3.1 Structure of the hypereutectic silumin in the initial state

Hypereutectic silumin (Al- (22-24) wt.% Si), which is in the cast state, is used as a study material. The shape of the samples is a cylinder. The high is 5 mm, the diameter is 30 mm.

The structure of the hypereutectic silumin in the initial state is characterized by the presence of inclusions of primary silicon. The form is mainly of lamellar, whose dimensions (longitudinal) reach 100 microns (Fig. 3.1). Inclusions of intermetallic phases are revealed (Fig. 3.1, (b), intermetallic particles are indicated by arrows). The main disadvantage of the hypereutectic silumin in the cast state is the presence of pores of micron and submicron sizes.

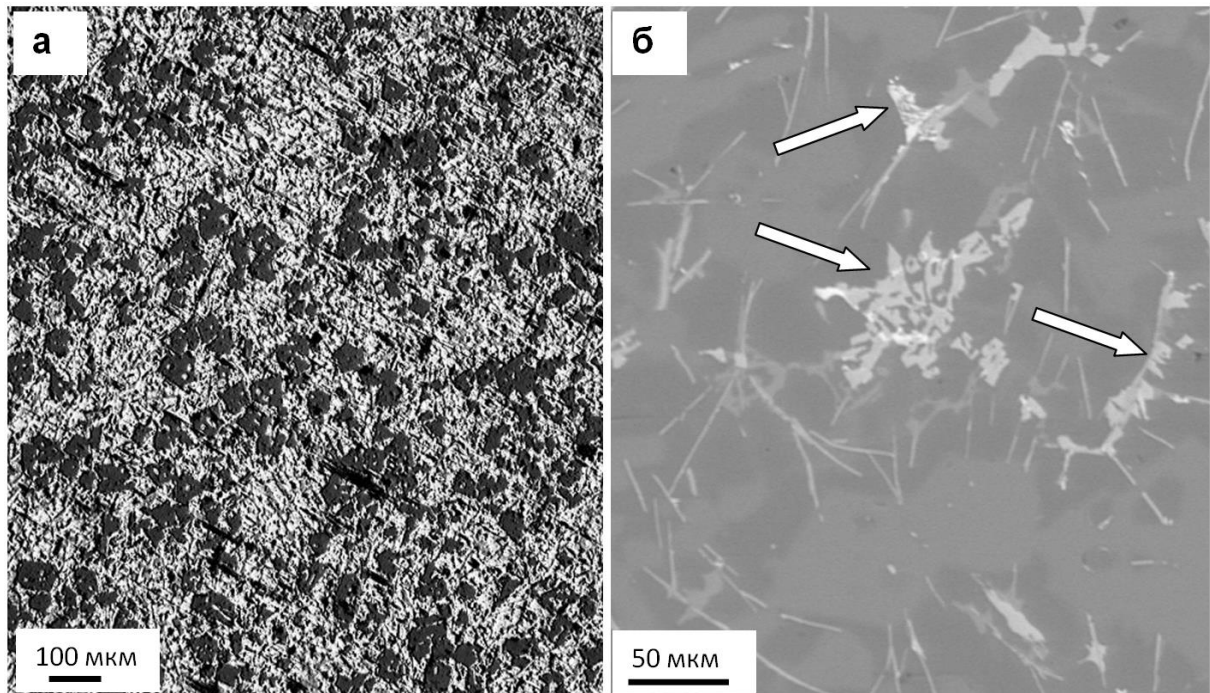


Figure 3.1 - Structure of the hypereutectic silumin in the cast state: a) - optical microscopy, b) - image obtained by scanning electron microscopy

X-ray diffraction analysis revealed that in the silumin there are two main phases - a solid solution based on aluminum and a solid solution based on silicon (the X-ray diffraction section is shown in Figure 3.2).

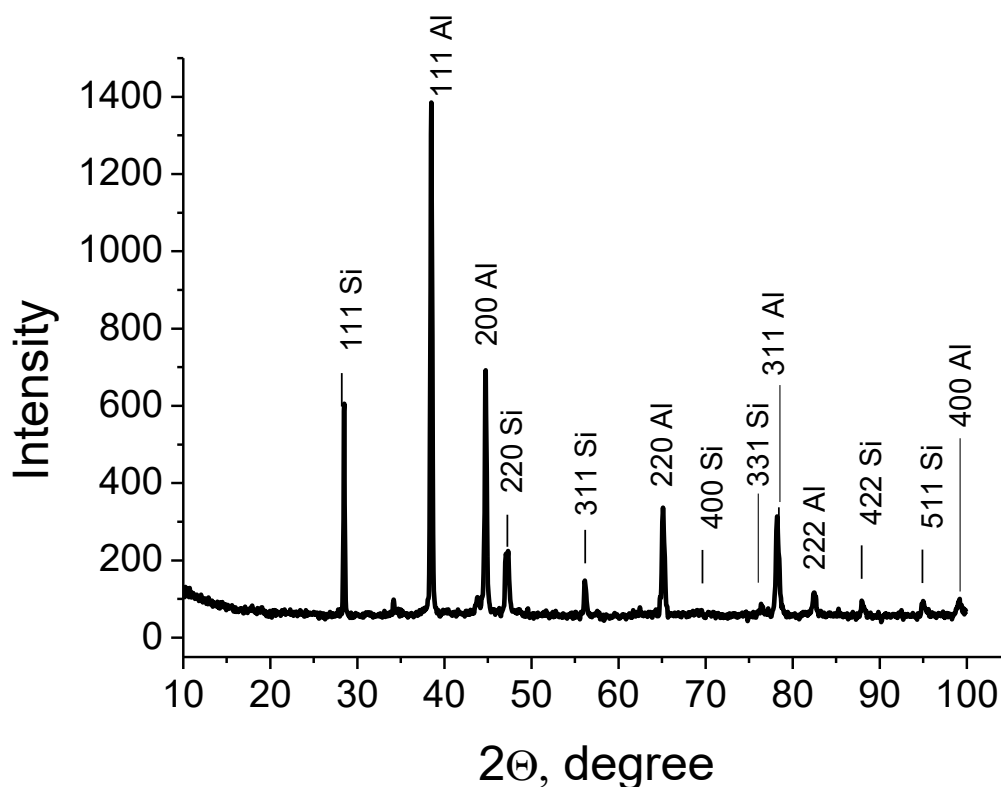


Figure 3.2 - X-ray diffraction pattern of the cast silumin of hypereutectic composition

The additional phases are intermetallic compounds and oxides. X-ray analysis revealed the presence of diffraction maximums of phases $Mg_{0.54}Fe_{0.46}SiO_3$, $Al_{0.83}Mg_{0.17}$, MgO и NiO (Ni, Mg) O .

Elemental composition of silumin in the initial state was determined by micro-X-ray analysis using an attachment to a scanning electron microscope. The results of the analysis, which are averaged over the area of the test material, are presented in Table 3.1.

Micro-X-ray spectral analysis allows investigation of separate inclusions (point-by-point analysis). The results of this analysis are shown in Figure 3.3. Micro-x-ray spectral analysis of the inclusion. The shape of the inclusions is plate-like (Figure 3.3, inclusion indicated by an oval) revealed an increase in the content of iron, nickel and copper atoms in relation to the average value for the material (Table 3.1).

Table 3.1 - Elemental composition of silumin of hypereutectic composition in cast state

Element	wt.%	at.%
Al	74.05	75.84
Si	22.57	22.21
Mg	0.56	0.64
Fe	1.29	0.64
Ni	0.52	0.24
Cu	1	0.44
Sum	100	100

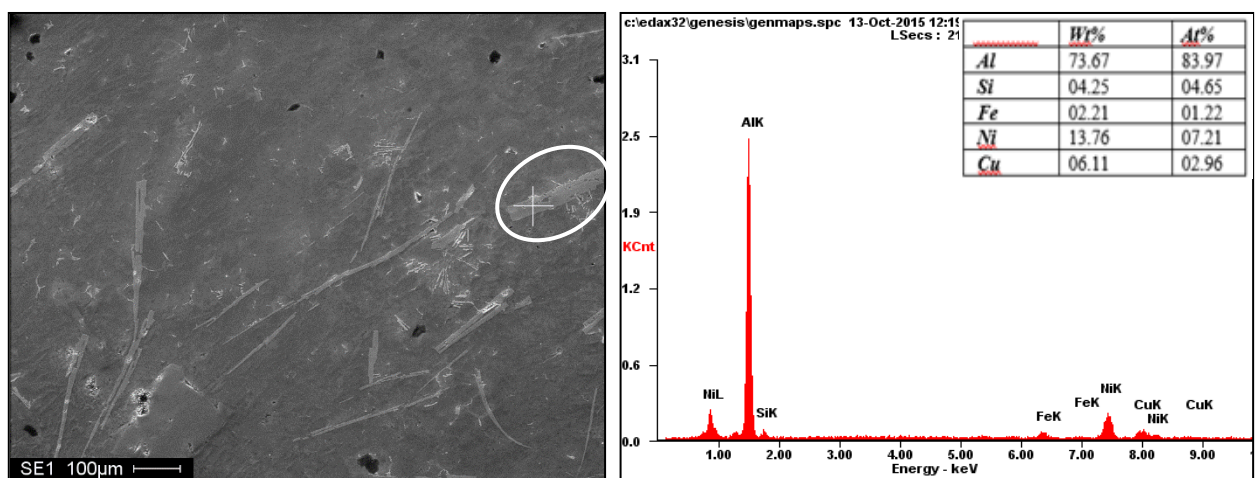


Figure 3.3 - Energy-dispersive analysis of the inclusion selected by the oval

Mechanical properties of the samples of silumin of hypereutectic composition in the cast state were characterized by the value of microhardness. It is established that the silicone microhardness (averaged over 10 measurements) is 3530 MPa. The tribological characteristics of the investigated silumin were characterized by the wear coefficient (the inverse of wear resistance) and the coefficient of friction. It is established that the coefficient of wear of silumin is $5.5 * 10^{-4} \text{ mm}^3 / \text{N} * \text{m}$, coefficient of friction is 0.43.

The performed studies of the structure, elemental and phase composition showed that the silumin of the hypereutectic composition in the cast state is characterized by the presence of coarse crystals of primary silicon and intermetallic compounds. This circumstance may indicate low service characteristics of the material.

3.2 Structure of the hypereutectic silumin treated with an intense pulsed electron beam at the SOLO facility

Irradiation of silumin samples was shown by calculations of the temperature field performed earlier [53-55], in the melting mode of all phases present in the material (18 keV, 40 J/cm², 200 μs, 0.3 c⁻¹, 20 imp). Figure 3.4 shows microphotographs of the surface of the samples treated with an intense pulsed beam. The number of micropores is significantly reduced due to high-speed melting and subsequent high-speed crystallization of the surface layer. The dimensions of the crystals vary within the range (0.4-0.5 μm), which make up the structure of the modified sample (Figure 3.4, b). Micro-X-ray spectral analysis showed that the silicon concentration in the surface layer varies within (10 ... 12) at. %. This fact corresponds to the composition of the eutectic of the aluminum-silicon alloy.

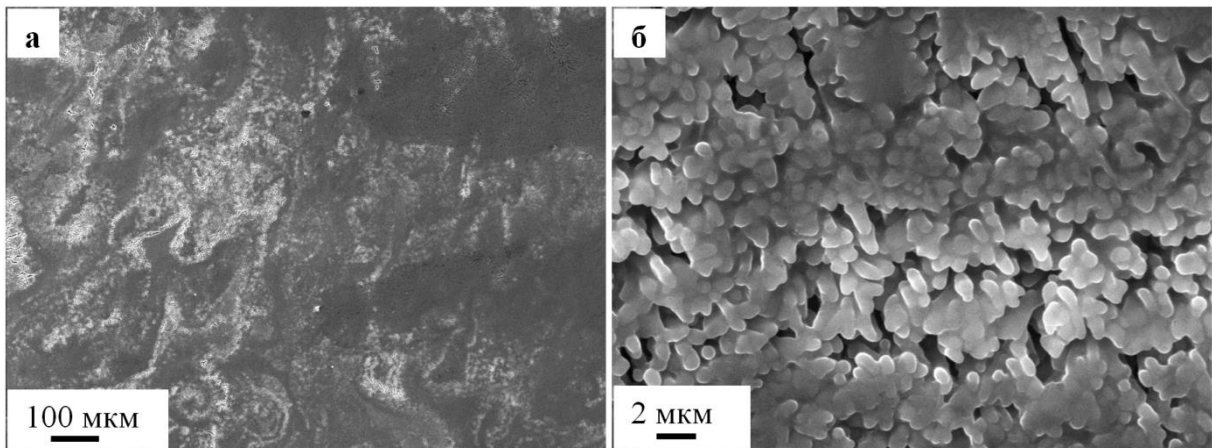


Figure 3.4 - Electron microscopic image of the surface structure of a cast silumin, irradiated by an intense pulsed electron beam

Analysis of the cross-section structure revealed the formation of a multilayer structure, a characteristic image of which is shown in Fig. 3.5. There is a thin (2-4 μm) surface layer and a layer with a grain structure (grain size 2-4 μm) (Fig. 3.5, b). On the grain boundaries, inclusions of the second phase are observed, which may be particles of silicon. The depth of the melted layer is (100-130) μm (Figure 3.5, a).

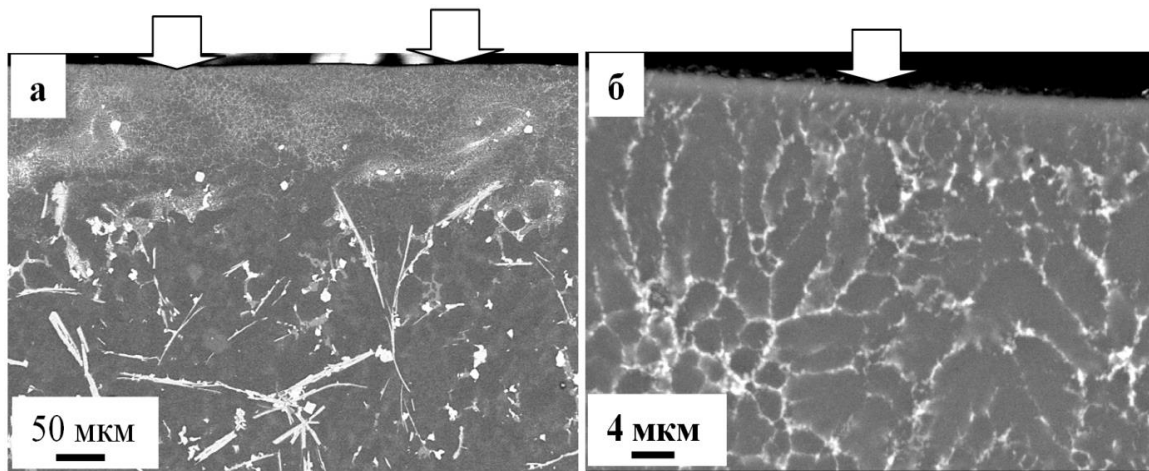


Figure 3.5 - Silumin structure, formed as a result of the action of an intense pulsed electron beam; arrows indicate the irradiation surface

X-ray diffraction analysis of the modified sample showed that the action of the electron beam leads to a multiple (in 2 ... 3 times) decrease in the sizes of the coherent scattering regions of both aluminum and silicon. The increase in the parameters of the crystal lattices of aluminum and silicon is due to the dissolution of intermetallics and the doping of the crystal lattice of aluminum and silicon by atoms of impurity elements (magnesium, iron, copper, nickel). This proposal is confirmed by the absence of diffraction lines of intermetallic phases on the roentgenogram.

The results of micro-X-ray spectral analysis of silumin treated with an intense pulsed electron beam, revealed in the investigation of the cross-section structure are shown in Figure 3.6.

Analyzing the results in Figure 3.6, we can note that in the surface layer with a thickness of $\approx 110 \mu\text{m}$, the silicon concentration varies from 5 to 27 wt. %; the concentration of atoms of impurity elements (copper) is in the range from 1 to 7 wt. %.

At a greater distance from the irradiation surface, the inhomogeneity in the distribution of silicon and impurity elements increases sharply.

This means that the irradiation of the hypereutectic silumin with an intense pulsed electron beam (18 keV, 40 J / cm², 200 μs , 0.3 c⁻¹, 20 imp) is accompanied by dispersion of the inclusion of silicon and intermetallides in the surface layer.

The thickness of that layer is 100-110 μm . On the average the concentration of elements revealed by summation along the line (Figure 3.6, a) corresponds to the elemental composition of the original silumin (Figure 3.7).

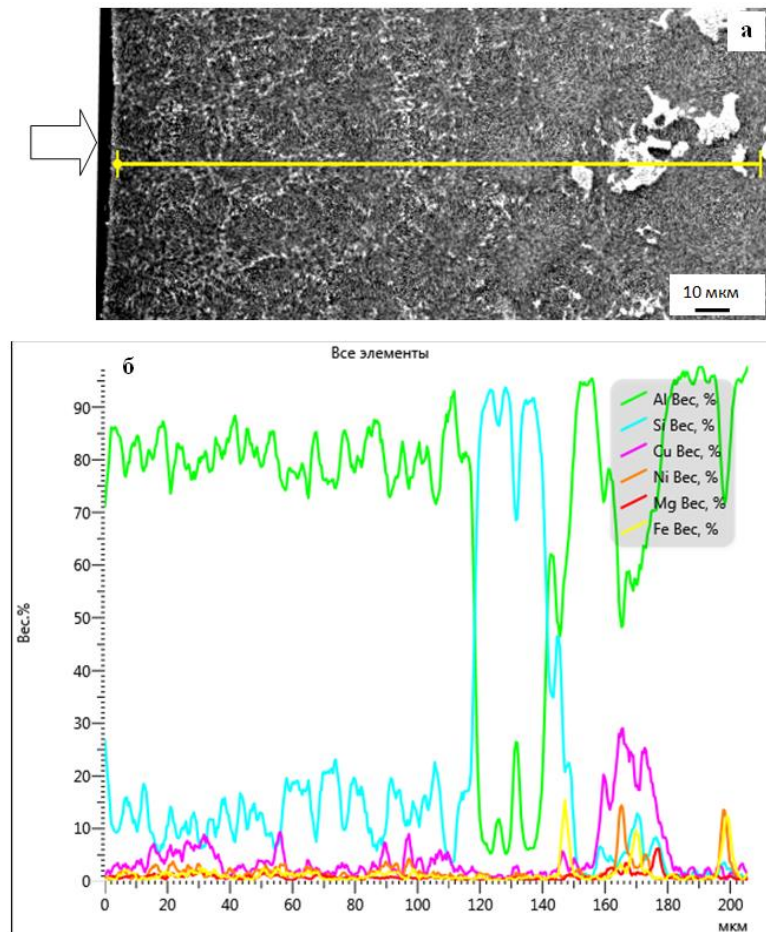


Figure 3.6 - Micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of silumin, irradiated by an intense pulsed electron beam; A is an image of the cross-section structure; B - distribution of the concentration of elements along the line indicated in (a). The arrow indicates the irradiation surface

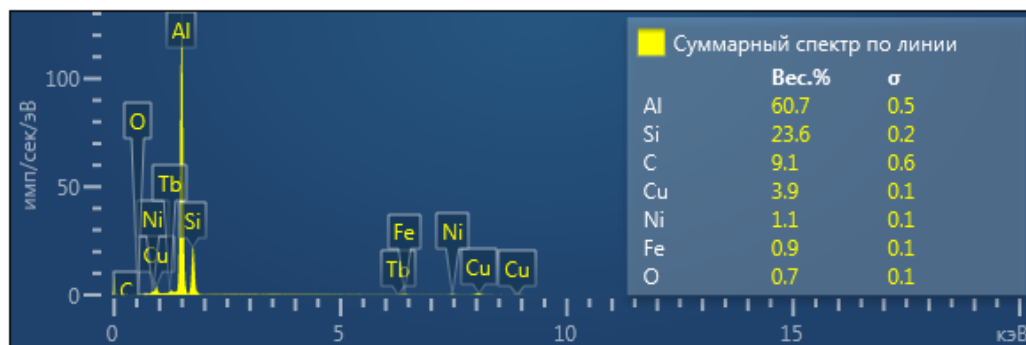


Figure 3.7 - Energy spectra of elements present in the surface layer of a hypereutectic silumin treated with an electron beam. The table shows the total concentration of elements along the line (Figure 3.6, a)

The modification of silumin with the intense with a pulsed electron beam leads to an increase in the microhardness of the surface layer to 5876 MPa (in ≈ 1.7 times); the coefficient of wear of silumin is $4.5 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, which corresponds to an increase in wear resistance of ≈ 1.2 times. The coefficient of friction of the material in this case practically does not change.

The performed studies of the structure, elemental and phase composition of the hypereutectic silumin demonstrate a radical change in the structure of the surface layer after irradiation with an intense pulsed electron beam. It is found out that a structure with a quasiuniform distribution of silicon atoms and impurity elements is formed in a surface layer of about 100 μm in thickness. This is due to the high-speed melting and subsequent high-speed crystallization of this surface layer, which take place in the electron-beam treatment of silumin. Dispersing the structure of silumin is accompanied by an increase in the microhardness of the surface layer of ≈ 1.7 times, and wear resistance of ≈ 1.2 times.

3.3 Formation of the "film (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) substrate system"

One of the alternative method to increase the mechanical and tribological characteristics of the material is doping of a surface layer. A thin film of alloying elements is sprayed onto the surface of the part or product and melted with the surface layer of the substrate using concentrated energy fluxes (laser beams, plasma flows, electron beams).

In the present work, an alloy of Zr-5% Ti-5% Cu composition was deposited on the surface of the silumin. The "film" (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24) wt.% Si) substrate system was formed by ion-plasma method during arc-sputtering of a Zr-5% Ti-5% Cu cathode (setup "TRIO" (ISE SB RAS)) [56]. The film thickness is 1 μm . A typical image of a film formed on the surface of silumin is shown in Figure 3.8. It is clearly seen that arc sputtering of the cathode is accompanied by the formation on the surface of the silumin of a thin film

containing a large amount of a drop fraction. The droplet size, detected by scanning electron microscopy, varies from a few micrometers to several tens of micrometers.

The elemental composition of the surface layer of the "film / substrate" system is revealed by means of micro-X-ray spectrum analysis, shown in Figure 3.9.

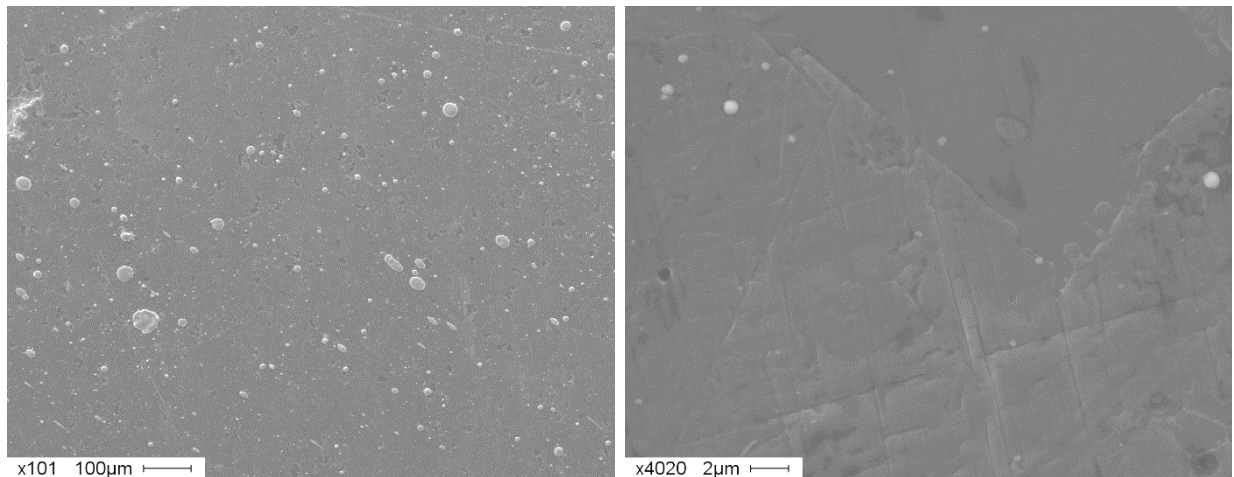


Figure 3.8 - Structure of a film formed on the surface of silumin by spraying a cathode of Zr-5% Ti-5% Cu

The results presented in Figure 3.9 demonstrate the presence of all the elements present in the starting material, as well as the elements of the deposited film.

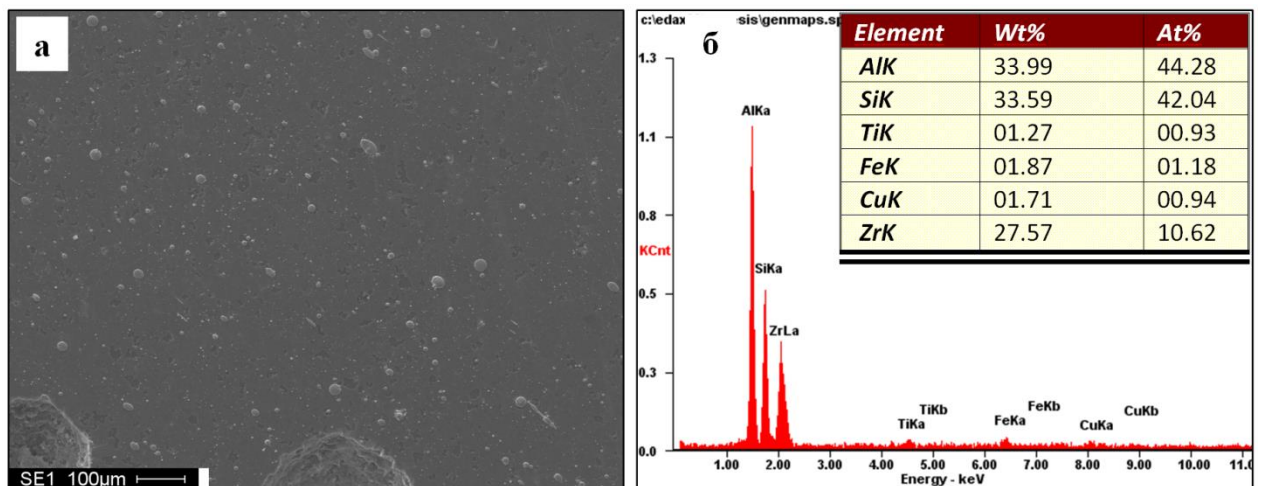


Figure 3.9 - Energy dispersion analysis of the "film- (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24) wt.% Si) substrate"

The results of the micro-X-ray spectral analysis of the drop fraction are shown in Fig. 3.10 (the particle with which the energy spectra are obtained is indicated by an arrow). It is clearly seen that the droplets on the film are formed mainly by zirconium atoms.

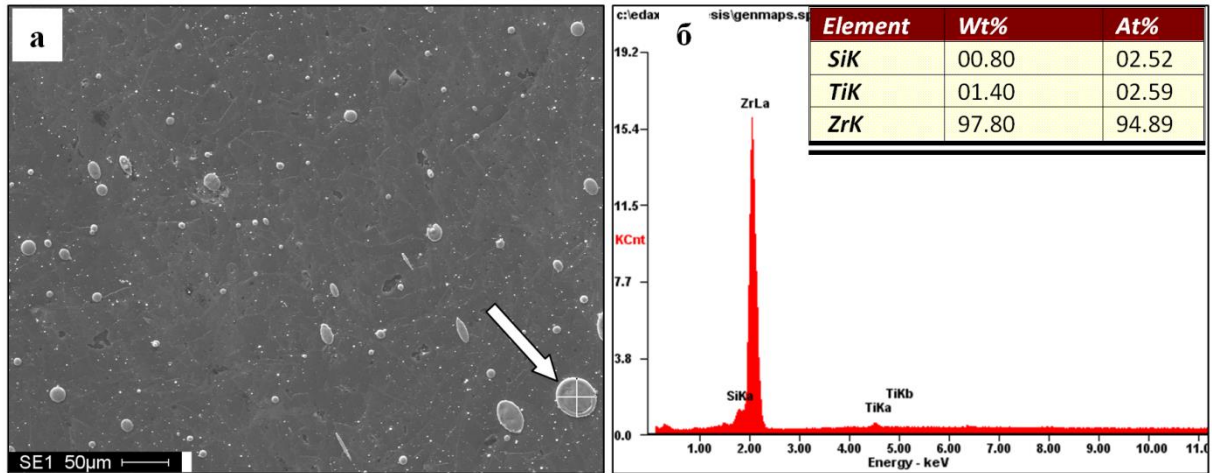


Figure 3.10 - Energy dispersion analysis of the "film- (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24)% Si) substrate system". The energy spectra are obtained from the drop indicated on (a) by the arrow

The phase composition of the "film- (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24)% Si) substrate system" was studied by X-ray diffraction analysis. The results of X-ray phase analysis are shown in Figure 3.11 and in Table 3.2. It is clearly seen that along with the phases forming the substrate (Al and Si), there are phases formed during the deposition of the film (Ti, Zr, CuZr, and SiC).

Table 3.2 - Phase composition of the "film- (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24) wt.% Si) substrate" system, revealed by X-ray phase analysis

Phase	%
Al	28,9
Si	26,0
Ti	5,1
CuZr	0,2
Zr	10,8
SiC	28,9

As a result of the conducted investigations, it has been established that when the cathode is electro-sputtered with a Zr-5% Ti-5% Cu composition, a film

is formed on the surface of the silumin, represented by the elements of the atomized cathode. The film contains a large number of microdroplets enriched in zirconium atoms.

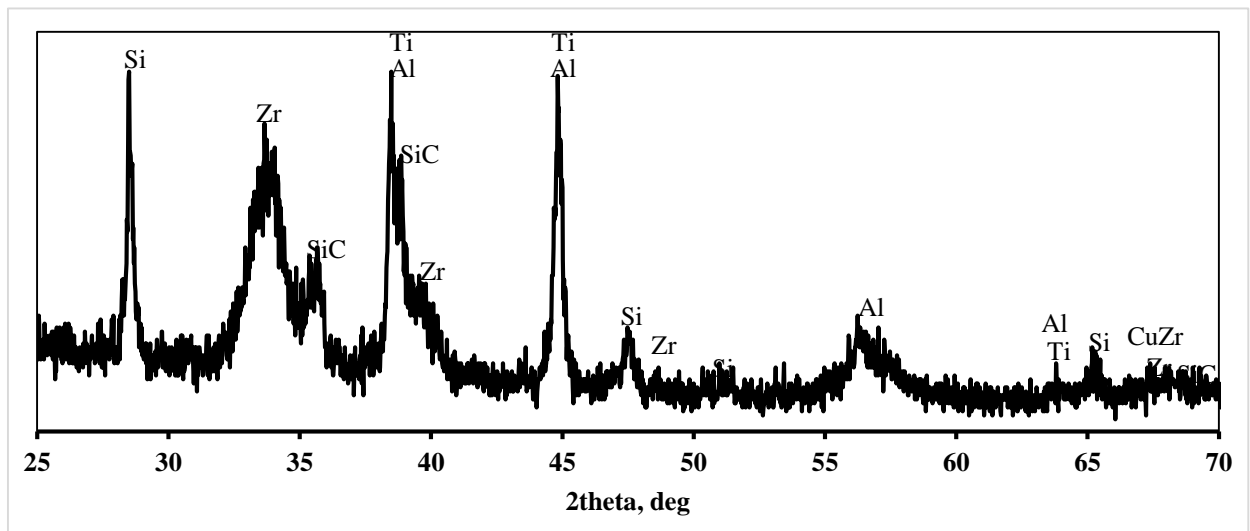


Figure 3.11 - X-ray diffraction pattern of the surface layer of the "film ((Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24) wt.% Si) substrate"

The formation of the "film ((Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24)% Si) substrate" system reduces the microhardness of the surface layer to 2310 MPa (in $\approx 1, 5$ times), the wear coefficient of the "film / substrate" system is $5.8 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, which corresponds to the wear resistance of silumin in the cast state.

3.4 Formation of a surface alloy upon irradiation of the "film (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) substrate system" by an intense pulsed electron beam at the «SOLO»

The doping of the hypereutectic silumin's surface layer was carried out by melting the "film-substrate" system with an intense pulsed electron beam at the "SOLO". Irradiation modes: the energy of accelerated electrons is 18 keV, the energy density of the electron beam is $40 \text{ J} / \text{cm}^2$, the pulse repetition rate is 0.3 s^{-1} , the duration of the electron beam action is $200 \mu\text{s}$, the number of pulses of the action is 20.

Figure 3.12 shows an image of the structure of the silumin surface formed by irradiating the film (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) substrate system with an intense pulsed electron beam. First of all, attention is drawn to the almost complete absence of a microdrop fraction (compare with Figure 3.8 and Figure 3.10). The second feature

of the structure formed upon irradiation is the formation of a polycrystalline structure with a crystallite size varying within (0.5-1) μm (Figure 3.12, b).

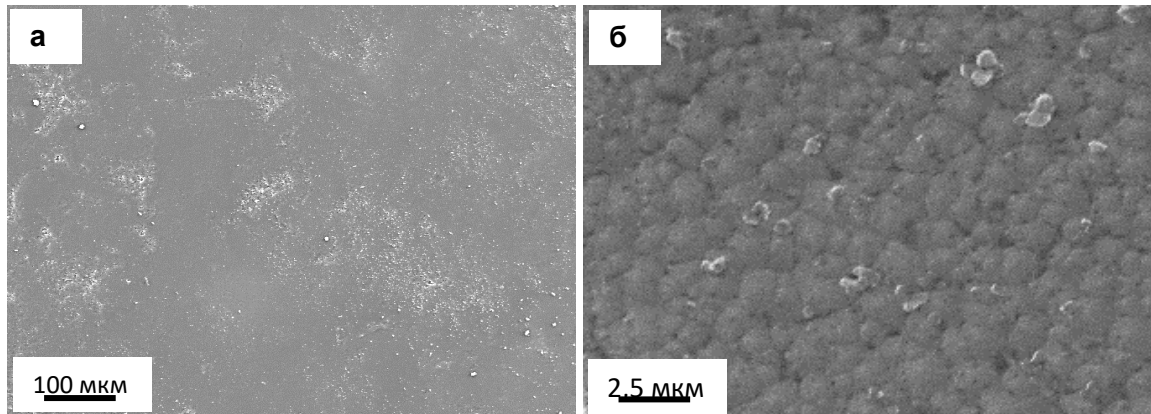


Figure 3.12 - Structure of the film formed on the silumin surface upon irradiation of the "film (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) substrate system" by an intense pulsed electron beam on the SOLO unit

Figure 3.13 and Figure 3.14 show an image of the cross-sectional structure of the "film (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) substrate" system irradiated by an intense pulsed electron beam. It is clearly seen that in a layer with a thickness (100-150) μm a quasi-homogeneous structure is formed whose crystallite sizes vary within the range of 1-5 μm . It can be assumed that this layer was formed as a result of high-speed melting and subsequent high-speed crystallization of the material. Consequently, we can talk about liquid-phase doping of the surface layer of silumin with elements of a sputtered film.

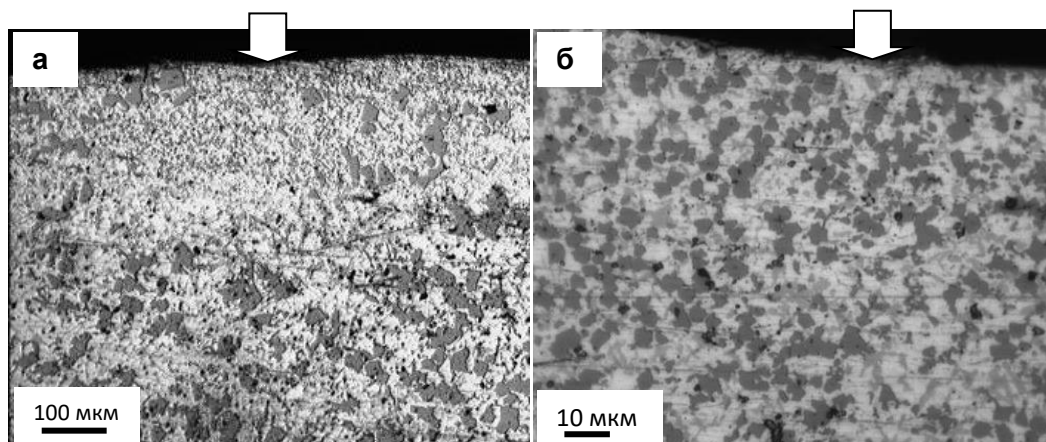


Figure 3.13 - Cross-sectional structure of a hypereutectic silumin sample subjected to surface doping by irradiating the film (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) substrate system with

an intense pulsed electron beam. The arrows indicate the irradiation surface.

Optical microscopy

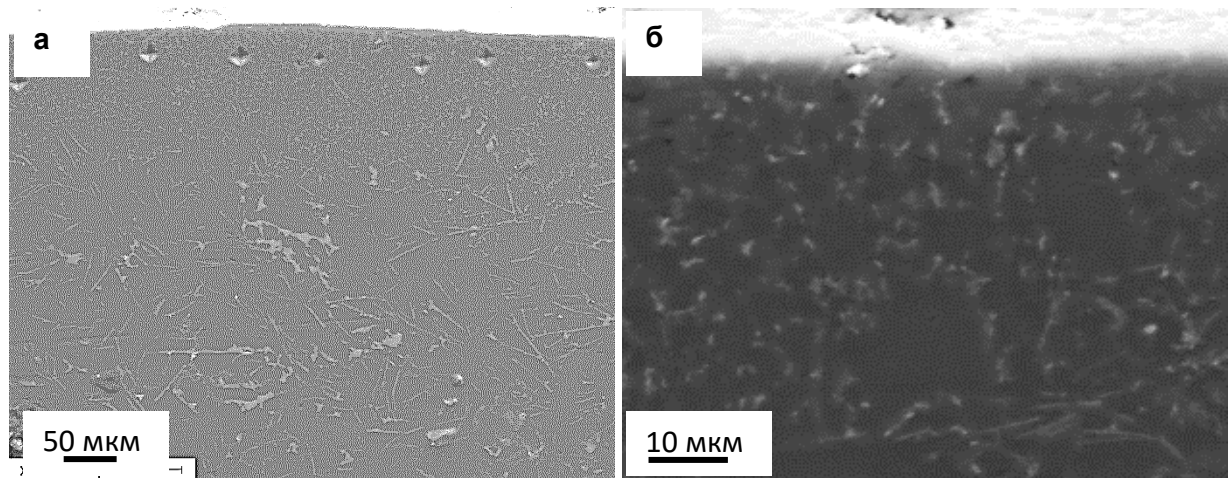


Figure 3.14 - Cross-sectional structure of a hypereutectic silumin sample subjected to surface doping by irradiating the "Zr-Ti-Cu / Al-Si" film system with an intense pulsed electron beam. SAM

Figure 3.15 shows the results obtained with a micro-X-ray spectral analysis of the surface layer of a specimen of the hypereutectic silumin doped by irradiating the film (Zr-Ti-Cu) / (Al-Si) substrate system with an intense pulsed electron beam.

Analyzing the obtained results, we can note the following facts. First, irradiation of the film / substrate system with an electron beam leads to a significant decrease in the concentration in the surface layer of zirconium atoms (compare the results presented in the tables in Fig. 3.9 and Fig. 3.15). This fact indicates the dissolution of the film in silumin. Secondly, the surface layer is characterized by a high concentration of silicon atoms, more than twice the silicon concentration of the cast silumin. This fact may indicate evaporation from the surface of silumin in the electron-beam processing of a sample of aluminum atoms and, correspondingly, a significant increase in the concentration of silicon in a thin surface layer. A similar effect was observed also when a silumin was irradiated by an intense pulsed electron beam (Fig. 3.6).

The phase composition of the surface layer of the "film- (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24)% Si) substrate" system irradiated with an intense pulsed electron beam was studied by X-ray diffraction analysis. The x-ray diffraction pattern from a sample of silumin, subjected to surface doping, is shown in Figure 3.16.

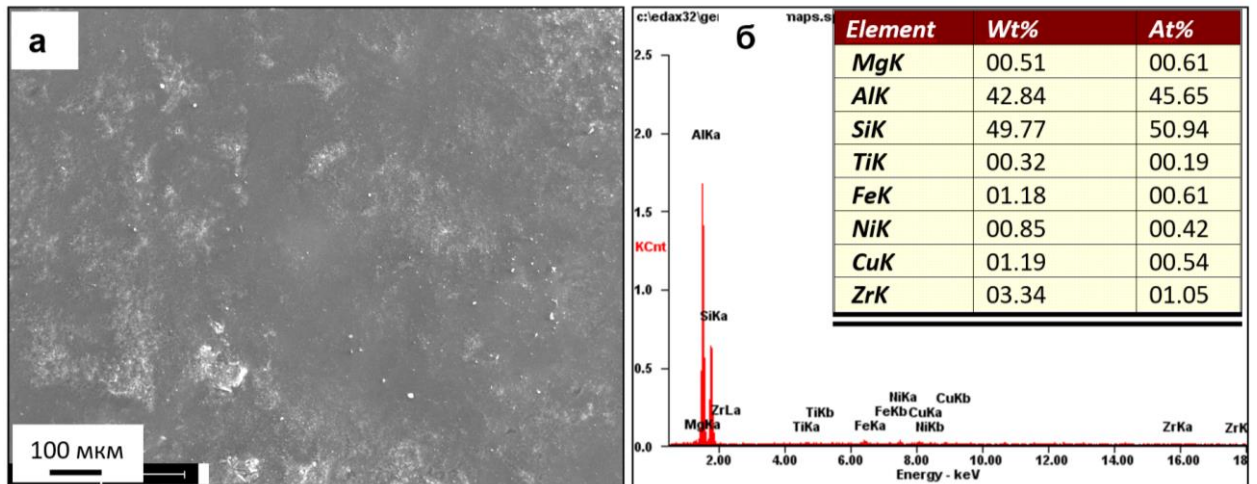


Figure 3.15 - Energy dispersive analysis of the "film- (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24)% Si) substrate system" irradiated with an intense pulsed electron beam

X-ray diffraction analysis shows that the main phases of the surface alloy are aluminum and silicon (63.5% -Al, 32.1% -Si). Additional phases formed as a result of melting of the film / substrate system are $\text{Cu}_{9.1} \text{Al}_{31.2} \text{Si}_{0.78}$, $\text{Fe}_3\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$, Ti.

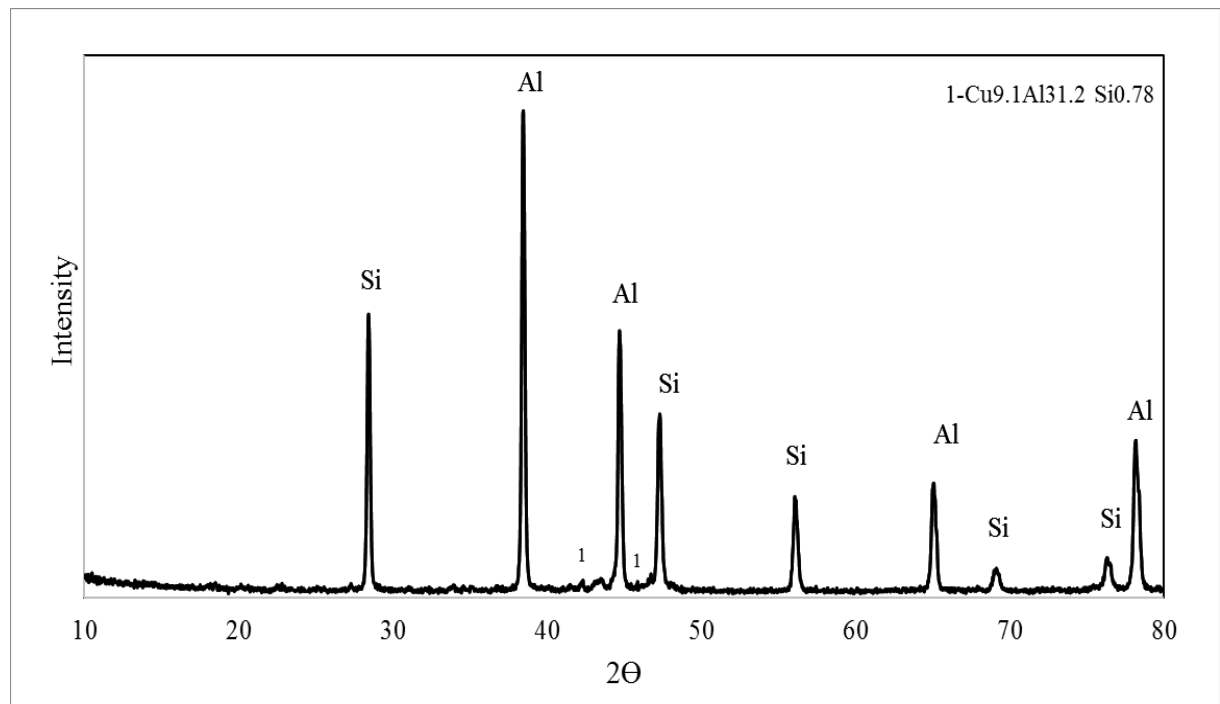


Figure 3.16 - X-ray diffraction pattern of the surface layer of the "film ((Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24) wt.% Si) substrate" irradiated with an intense pulsed electron beam

The formation of a surface alloy upon doping the hypereutectic silumin by melting the "film ((Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24) wt.% Si) substrate" is intensified by a pulsed electron beam and leads to a decrease in the microhardness of the doped layer up to 2060 MPa, i.e. ≈ 1.7 times, the wear factor of silumin is $2.1 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, which corresponds to an increase in wear resistance of ≈ 2.6 times. The friction coefficient of the material was 0.39, which is 1.1 times less than the coefficient of friction of the cast silumin.

The studies of the structure, elemental and phase composition of the "film ((Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (22-24) wt.% Si) substrate" system irradiated with an intense pulsed electron beam prove the formation of a surface alloy that possesses a submicrocrystalline and microcrystalline multiphase structure and is characterized by high wear resistance, which is about 2.6 times greater than the wear resistance of the hypereutectic silumin in the cast state.