

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

---

Школа новых производственных технологий  
Направление подготовки 15.04.01 Машиностроение  
Отделение школы (НОЦ) Материаловедения

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Влияние термомеханической обработки на структуру, механические и трибологические свойства композитов Al-Si-Sn</b>

УДК 620.22-419.8:621.78.01

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Караваев Владимир Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Коростелева Е.Н.	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Старикова Е.В.	к.ф.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
15.04.01	Коростелева Е.Н.	к.т.н., доцент		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

### 15.04.01 «Машиностроение»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i><b>Профессиональные компетенции</b></i>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и обработки новых материалов
P2	Применять глубокие знания в области современных технологий машиностроительного производства для решения междисциплинарных инженерных задач
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с созданием и обработкой материалов и изделий, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов машиностроения
P4	Разрабатывать технологические процессы, проектировать и использовать новое оборудование и инструменты для обработки материалов и изделий, конкурентоспособных на мировом рынке машиностроительного производства
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных технологий обработки материалов, nano технологий, создания новых материалов в сложных и неопределенных условиях
P6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные высокотехнологичные линии автоматизированного производства, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на машиностроительном производстве, выполнять требования, по защите окружающей среды
<i><b>Универсальные компетенции</b></i>	
P7	Использовать глубокие знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности
P8	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, разрабатывать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
P10	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития
P11	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

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

---

Школа новых производственных технологий  
Направление подготовки (специальность) 15.04.01 «Машиностроение»  
Отделение школы (НОЦ) материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Коростелева Е.Н.  
(Ф.И.О.)

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

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
4АМ61	Караваеву Владимиру Евгеньевичу

Тема работы:

<b>Влияние термомеханической обработки на структуру, механические и трибологические свойства композитов Al-Si-Sn</b>
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследования являются смеси порошков (Al-Si)-40Sn с различным содержанием кремния.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Изучение литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки в области получения и применения композиционных порошков; актуальность работы и постановка задачи; методы получения и исследования объекта; анализ результатов выполненной работы; заключение.
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация в Microsoft Power Point

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Е.В.
Социальная ответственность	Раденков Т.А.
Разделы, выполненные на иностранном языке	Демьяненко Н.В.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Используемые материалы и методы их исследования	
The materials and their research methods	

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

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Коростелева Е.Н.	к. т. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4АМ61	Караваяев В.Е.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 119 страниц, 29 рисунков, 26 таблиц, 51 источник, 1 приложение.

Ключевые слова: композиционный порошок, олово, алюминий, кремний, жидкофазное спекание, горячее доуплотнение, интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование.

Объектом исследования являются композиционные порошки (Al-Si)-Sn с различным содержанием Si.

Цель работы – исследование влияния режима спекания порошковых прессовок, а также последующей их деформационной обработки методом горячего доуплотнения и равноканального углового прессования (РКУП) на результирующую структуру, механические и трибологические свойства композитов (Al-Si)-40Sn.

В процессе выполнения диссертации были исследованы композиты системы (Al-Si)-40Sn с содержанием кремния 0,5; 12 и 23 вес. %.

В результате исследования были описаны объемные изменения, структурные особенности, показатели прочности и износостойкости спеченных и подвергнутых горячей допрессовки композитов системы (Al-Si)-40Sn.

Степень внедрения: внедрение в производство не осуществлено.

Область применения: порошковая металлургия, аддитивные технологии.

Значимость работы – проект обладает высокой ресурсоэффективностью и является ресурсосберегающим.

В будущем планируется исследовать влияние других легирующих компонентов на композиты системы Al-Sn.

Введение.....	8
1 Обзор литературы.....	11
1.1 Антифрикционные материалы .....	11
1.2 Методы порошковой металлургии.....	17
1.3 Методы деформационной обработки .....	22
2 Используемые материалы и методы их исследования.....	32
2.1 Исходные материалы, методы изготовления образцов и измерения их механических свойств.....	32
2.2 Исследование структуры композитов (Al-Si)-Sn.....	38
2.3 Трибологические испытания композитов (Al-Si)-Sn.....	40
3 Результаты работы.....	43
3.1 Влияние состава порошковой смеси и режима ее спекания на структуру, механические и трибологические свойства композитов (Al-Si)- 40Sn.....	43
3.2 Влияние деформационной обработки на структуру, механические и трибологические свойства спеченных композитов (Al-Si)-40Sn .....	56
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	65
4.1 Предпроектный анализ. Потенциальные потребители результатов исследования.....	66
4.2 SWOT-анализ.....	70
4.3 Инициация проекта.....	72
4.4 Планирование управления научно-техническим проектом.....	75
5 Социальная ответственность.....	80
5.1 Введение.....	82

5.2 Техногенная безопасность.....	82
5.2.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	82
5.2.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	92
5.2.3 Региональная безопасность.....	95
5.2.4 Организационные мероприятия обеспечения безопасности...	96
5.2.5 Особенности законодательного регулирования проектных решений.....	98
5.2.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	99
Заключение.....	100
Список публикаций студента.....	101
Список использованных источников.....	102
Приложение А.....	108

## Введение

В современных машинах и механизмах до 30 % потребляемой ими энергии расходуется на трение, а расходы на устранение последствий их износа в развитых промышленных странах составляют до 2 % валового национального продукта. Следовательно, проблема снижения интенсивности изнашивания ответственных деталей в узлах трения является актуальной, а для ее решения требуется создание новых антифрикционных материалов с улучшенными механическими и трибологическими свойствами или модернизация существующих. Успешное решение данной проблемы может дать значительный экономический эффект.

Сплавы на основе системы Al-Sn отвечают всем необходимым требованиям, предъявляемым к антифрикционным материалам, поскольку обладают высокой теплопроводностью, усталостной прочностью, коррозионной стойкостью [1]. Они содержат включения мягкого олова, которое при дефиците жидкой смазки способно выдавливаясь на поверхность трения и образовывать защитную пленку, выполняющую функцию твердой смазки. С увеличением содержания Sn износостойкость и давление схватывания сплавов Al-Sn со стальным контртелом растёт. Однако при получении таких сплавов литьем содержание олова в них ограничено 20 вес.% по причине дезинтеграции алюминиевого каркаса оловянными прослойками при кристаллизации расплава и, как следствие, значительного снижения несущей способности и пластичности сплавов. Относительно недавно было установлено [2], что решить данную проблему возможно с помощью методов порошковой металлургии. В этом случае предельная концентрация олова в спеченных композитах Al-Sn, при которой алюминиевый каркас остается связанным, достигает 50 вес.%. Было обнаружено, что максимальной износостойкостью при сухом трении по стальному контртелу обладает композит, содержащий около 40 вес. % (20 об. %) Sn. При этом значительный вклад в величину износа



такого материала вносила деформационная составляющая, из-за низкой его несущей способности, вызванной наличием большого количества мягкого олова.

Известны попытки повышения износостойкости сплавов Al-Sn за счет их деформационного упрочнения. Однако испытания полученных материалов показали, что деформационная обработка далеко не всегда приводит к заметному повышению их износостойкости [3,4]. Более того, коэффициент трения упрочнённых материалов по стали даже увеличивался. Дело в том, что в результате деформирования включения олова сильно измельчались, и объем их как источников твердой смазки значительно снижался. В результате, не смотря на значительное упрочнение композитов Al-Sn, не обеспечивалась эффективная подача твердой смазки на поверхность трения и, соответственно, износостойкость их не увеличивалась.

Другим известным методом повышения износостойкости композиционных материалов является введение в их состав твёрдых частиц, прочно закреплённых в матрице. Однако в случае химически активной алюминиевой матрицы с указанной целью можно использовать немногие твёрдые вещества, не образующие с ней хрупких переходных слоёв. Добавки также не должны растворяться в олове и снижать его пластичность, а также повышать напряжение сдвига. Указанным условиям, например, удовлетворяет кремний, который часто вводят с целью повышения износостойкости алюминиевых сплавов [5-8]. Поскольку алюминий и олово в твердой фазе взаимно нерастворимы, то для введения в композит частиц Si лучше всего использовать порошки готового сплава Al-Si, легированного заданным количеством компонентов. Если при этом положительный эффект кремния на износостойкость алюминия будет дополнен антизадирным эффектом олова как твердой смазки, то можно рассчитывать, что полученный новый материал будет износостойким не только в присутствии жидкой смазки, но и при ее дефиците на поверхности трения.

**Целью** настоящей работы является исследование влияния режима спекания порошковых прессовок, а также последующей их деформационной обработки методом горячего доуплотнения и равноканального углового прессования (РКУП) на результирующую структуру, механические и трибологические свойства композитов (Al-Si)-40Sn.

Исходя из цели работы, были поставлены следующие **задачи**:

1. Определить составы смесей порошков Al-Si с различным содержанием кремния (0,5, 12 и 23вес. %) и 40 вес. % Sn, а также режимы их спекания, позволяющие получать высокоплотные композиты с устойчивой к внешним деформационным воздействиям алюминиевой матрицей.

2. Исследовать влияние последующей деформационной обработки методами горячего доуплотнения (ГД) и равноканального углового прессования (РКУП) на структуру и механические свойства спеченных композитов (Al-Si)-40Sn.

3. Исследовать влияние содержания кремния, а также последующей деформационной обработки на трибологические свойства спеченных композитов (Al-Si)-40Sn.

## 1 Обзор литературы

### 1.1 Антифрикционные материалы

Антифрикционные материалы (от греч. anti – приставка, обозначающая противодействие, и лат. frictio – трение) обладают следующими свойствами: высокая теплопроводность; хорошая смачиваемость смазкой и хорошая прирабатываемость, основанная на способности материала пластически деформироваться при трении и увеличивать площадь контакта. В процессе эксплуатации подшипников скольжения из таких материалов режим жидкостного трения всегда сочетается с режимом граничной смазки, и практически неизбежен периодический контакт их со стальным валом, например, в моменты пуска и остановки агрегата. Поэтому также необходимо, чтобы антифрикционный материал обеспечивал низкий коэффициент трения ( $\mu$ ) при работе в условиях плохой смазки [9] и демонстрировал высокую несущую способность в широком интервале нагрузок и скоростей скольжения [10, 11].

Очень распространены подшипники скольжения из антифрикционных композиционных материалов (КМ) на металлической основе, характеризующихся высокой теплопроводностью, коррозионной стойкостью и прочностью [12, 13]. Их подразделяют на два типа: 1) композиционные материалы с мягкой матрицей и твердыми включениями; 2) композиционные материалы с твердой матрицей и мягкими включениями [14, 15]. В таблице 1.1 представлены допустимые режимы эксплуатации различных антифрикционных композитов. По данным таблицы видно, что в общем случае допустимое давление и скорость работы выше у композиционных материалов с большим количеством мягкой фазы.

В композиционных материалах первого типа мягкая матрица обеспечивает хорошую прирабатываемость и снабжение жидкой смазкой участков трения, что улучшает теплоотвод от них. Твердые включения воспринимают нагрузку от вала и обеспечивают сохранение несущей способности материала в процессе трения. Наиболее распространёнными в

промышленности материалами этого типа являются баббиты, а также сплавы на основе меди – бронзы и латуни. [16]

Таблица 1.1 – Характеристика антифрикционных КМ [14]

Материал	НВ	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		без смазочного материала	со смазочным материалом	$p$ , МПа	$v$ , м/с	$pv$ , МПа·м/с
<b>Баббиты</b>						
Б83	30	0,07 – 0,12	0,004 – 0,006	15	50	75
Б16	30			10	30	3
БК2	32			15	15	6
<b>Бронзы</b>						
БрО10Ф1	100	0,1 – 0,2	0,004 – 0,009	15	10	15
БрО5Ц5С5	60			8	3	12
БрС30	25			25	12	30
<b>Латуни</b>						
ЛЦ16К4	100	0,15 – 0,24	0,009 – 0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	80			10,6	1	10
<b>Алюминиевый сплав</b>						
АО9-2	31	0,1-0,15	0,008	25	20	100
<b>Антифрикционные серые чугуны</b>						
АЧС-1	220	0,12-0,23	0,008	2,5	5	10
АЧС-3	160		0,016	6	0,75	5

Баббиты представляют собой мягкие антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе с твердыми включениями армирующей фазы. Они отлично прирабатываются и обладают наилучшими антифрикционными свойствами среди всех подшипниковых материалов. Однако из-за большого содержания в них дорогостоящего олова, баббиты используются в основном для подшипников ответственного назначения (дизелей, паровых турбин и др.). Баббиты имеют низкую твердость (13–32 НВ) и сравнительно малую усталостную прочность. Также, они обладают плохой теплопроводностью, вследствие чего размягчаются при нагреве (9–24 НВ при 100 °С), в результате их использование ограничено зоной невысоких температур и обязательным наличием смазки в узле трения. Усталостная прочность баббитов недостаточна для современных двигателей, работающих в условиях повышенных давлений, скоростей и температур, поэтому их постепенно вытесняют другие материалы [11].

Оловянистые и оловянисто-цинково-свинцовистые бронзы [17] сравнительно с баббитами обладают более низкими антифрикционными свойствами и функционируют при меньшей интенсивности внешнего воздействия. Также их недостатками являются низкая коррозионную стойкость и высокая стоимость. В некоторых случаях в качестве заменителей бронз в узлах трения применяют латуни. Однако по сравнению с бронзами их антифрикционные свойства еще более низкие и они не могут работать при высокой удельной мощности трения (PV) (таблица 1.1).

Среди антифрикционных материалов второго типа наибольшее распространение получили свинцовистая бронза БрС30, которая содержит 30 % свинца (ГОСТ 493-79), и алюминиевые сплавы с мягкой структурной составляющей из свинца или олова. Антифрикционные свойства этих сплавов, особенно алюминиевых, достаточно высокие, поскольку при граничном трении мягкие металлы образуют антизадирную пленку, которая препятствует прямому контакту между матрицей и стальным контртелом [18]. Благодаря хорошей теплопроводности слой смазочного материала сохраняется при работе на повышенных скоростях и с высоким давлением.

Свинцовистые бронзы отличаются высокой теплопроводностью, хорошей усталостной прочностью, способностью выдерживать высокие удельные нагрузки, а также широко применяются в качестве антифрикционного слоя для сильно нагруженных подшипников с большими удельными давлениями [19]. Главное преимущество свинцовистой бронзы БрС30 перед баббитом Б83 в том, что она сохраняет свою прочность при повышении температуры до 200 °С, обладает большими теплопроводностью и сопротивлением усталости. Однако при этом она уступает баббиту Б83 по пластичности, прирабатываемости и антифрикционным свойствам. Кроме того, свинцовистая бронза обладает низкой коррозионной стойкостью при воздействии органических кислот (из масел). Стоимость такой бронзы по сравнению с антифрикционными алюминиевыми сплавами выше.

К сплавам второго типа также относятся антифрикционные чугуны, с включениями графита, образующие антизадирную пленку в процессе трения [19]. Данные сплавы относительно дешевые, но имеют существенные недостатки, такие как высокая чувствительность к дефициту смазочного материала и низкая стойкость к воздействию ударной нагрузки. Поэтому, чугуны используются при меньших скоростях и нагрузках по сравнению с алюминиевыми антифрикционными сплавами.

В современном автомобилестроении широко распространены антифрикционные сплавы на алюминиевой основе. Данные материалы обладают высокой прочностью, теплопроводностью, коррозионной стойкостью, имеют низкую плотность и невысокую цену. В машиностроении наибольшее распространение получили алюминий-оловянистые сплавы с содержанием олова до 22,5 %. При содержании олова более 9 % возможно применение вкладыша без покрытия мягким металлом. В остальных случаях на поверхность трения наносят защитный слой олова. Наиболее применяемый сплав – А020-1 (1 %-Ca, 20 % - Sn, 0,02 - 0,1 Ti, остальное - Al). Олово располагается в нём в виде изолированных включений. При трении некоторая часть расположенных вблизи поверхности трения включений выдавливается и размазывается тонкой плёнкой. Прочно удерживаясь на поверхности вкладыша, плёнка выполняет функции смазки – исключает прямой контакт с контртелом и не даёт развиваться схватыванию [20].

Как следует из таблицы 1.1 антифрикционные сплавы системы Al-Sn способны работать при наибольшей удельной мощности трения. Данные сплавы по своим свойствам близки к баббитам. Высокие антифрикционные свойства обусловлены наличием мягкой структурной составляющей в виде олова.

Однако Sn является дорогим и дефицитным металлом, поэтому в качестве альтернативных материалов были исследованы алюминиевые сплавы, содержащие в качестве мягкой структурной составляющей металлы: Bi, Cd, Ga, Pb и Zn [1]. И поскольку первые три металла являются ещё более дефицитными, чем олово, то упор делался на изучении антифрикционных свойств сплавов со

свинцом и цинком [21-22]. Было установлено, что антифрикционные свойства некоторых таких материалов близки к свойствам промышленного сплава АО20-1 [23]. Например, сплав Al-20Pb-1,1Cu обладает более низким коэффициентом трения (при наличии смазки) на всем диапазоне нагрузок по сравнению со сплавом Al-20Sn-1,1Cu [24]. И хотя из-за того, что свинец по сравнению с оловом является более мягким металлом, сплавы Al-Pb менее прочны, но они обладают более высокой задиростойкостью и пластичностью. Однако широкому применению сплавов Al-Pb, особенно с высоким содержанием Pb, препятствует нерешённая проблема равномерного распределения сильно отличающихся по плотности фаз [25]. Кроме того, свинец является токсичным металлом, и его использование повсеместно пытаются ограничить.

Цинк не токсичен и пластичен, его температура плавления гораздо ниже температуры плавления алюминия, и ряд сплавов на основе системы Al-Zn даже нашёл применение в качестве антифрикционных самосмазывающихся материалов в подшипниках скольжения [26]. Такие сплавы обладают более высокой износостойкостью по сравнению со многими известными подшипниковыми материалами. Однако по сравнению с баббитами и сплавами систем Al-Sn и Al-Pb сплавы Al-Zn менее пластичны и значительно твёрже, что неизбежно приводит к повышенному износу стального вала в узлах трения и ускоренному износу самих антифрикционных материалов вследствие их низкой усталостной прочности.

В настоящее время имеется несколько направлений в создании антифрикционных сплавов на алюминиевой основе без существенного изменения технологии их производства. Предпочтение отдается способу повышения прочности сплавов, путем введения в алюминий легирующих добавок.

Имеются три цели введения легирующих добавок в антифрикционные алюминиевые сплавы:

1. Создание твердых фаз, снижающих износ материала (CuAl, FeAl, MgSi, Si, AlN и др.). Физические и химические свойства алюминидов и других

интерметаллических соединений, а также их форма, количество и распределение в алюминиевой основе влияют как на процесс трения, так и на прочность подшипника;

2. Изменение свойств алюминиевой матрицы. В качестве таких включений используются (Cu, Zn Mg, Ag), служат для повышения прочности сплава и повышения несущей способности. Иногда, дополнительное упрочнение достигается в результате дисперсионного твердения;

3. Легирование мягких составляющих сплавов для более активного переноса пленок мягкой фазы при ужесточении режимов трения.

Эффективной упрочняющей алюминиевый сплав добавкой является кремний, который образует эвтектику с Al. При эвтектической температуре (577 °С) растворимость кремния в алюминии составляет 1,65 %, а при комнатной температуре — 0,05 %. При содержании кремния выше 0,05 %, в структуре алюминия выделяется хрупкий твердый раствор кремния с алюминием (98 % Si) в виде иглообразных кристаллов, располагающихся по границам зерен алюминия и резко уменьшающих пластичность сплава и его трещиностойкость. Хотя в опытном сплаве твердый раствор перенасыщен и содержит 0,2 – 0,6 % кремния, выделения кремния по границам зерен не имеют резко выраженного игольчатого строения. Это можно объяснить влиянием на их образование меди и цинка. Включения кремния приводят к срезу образовавшихся очагов схватывания, предшествующих возникновению задира [27].

Так сплавы системы Al-Si обладают повышенной износостойкостью за счет упрочнения кремнием. Повышенное содержание Si в заэвтектических сплавах, полученных традиционным для металлургии литьем с низкой скоростью охлаждения, способствует снижению механических свойств материала, вследствие огрубления первичного Si. Технологии получения порошкового материала системы Al-Si спеканием и горячим прессованием на основе распыленных с высокой скоростью охлаждения расплавов обеспечивают повышение дисперсности кристаллов Si, определяющих физические и механические свойства материала [28]. Порошковые материалы системы Al-Si



являются востребованными для высоконагруженных элементов конструкций за счет высоких механических свойств, износостойкости и низкого коэффициента теплового расширения. Определяющее значение на механические свойства порошкового материала системы Al-Si оказывают объемная доля и размеры частиц Si. Предел прочности при растяжении увеличивается с уменьшением размеров частиц Si [29].

Согласно работе [8] в процессе трения в сплавах Al-Si эвтектического состава нагрузку воспринимают частицы кремния, выступающие над поверхностью алюминиевого образца. Добавление олова и увеличение содержания кремния приводит к значительному повышению износостойкости таких сплавов, особенно при повышенных скоростях скольжения. При этом у КМ, полученных методом порошковой металлургии снижение скорости износа более значительное, чем у сплавов, полученных литьем [7]. Также стоит отметить, что при увеличении нагрузки скорость износа в сплавах системы Al-Si-Sn повышалась гораздо меньше, чем в двухфазных сплавах Al-Si и Al-Sn [5].

Из представленного обзора следует, что на практике применяются антифрикционные материалы, как с большим количеством частиц твердой фазы, так и композиты с пластичной второй фазой. Выбор в пользу того или иного типа подшипникового материала диктуется не только множеством технических условий, при которых происходит его фрикционный контакт, но и экономическими соображениями, учитывающими соотношение «цена-качество». Поэтому становится важным не только состав антифрикционных материалов, но и способ их получения, определяющий производственные затраты.

## **1.2 Методы порошковой металлургии**

Эффективными при получении антифрикционных композиционных материалов являются методы порошковой металлургии (ПМ), включающие, в том числе, элементы аддитивной технологии [30]. Технология ПМ позволяет

создавать материалы с особыми, часто уникальными составами, структурой и свойствами, иногда вообще недостижимыми при применении других известных в промышленности методов производства. Для повышения физико-механических свойств спечённых изделий к ним может быть применена дополнительная обработка, целью которой также может быть придание изделиям окончательных размеров и формы.

Суть технологии ПМ как промышленного метода изготовления различных материалов заключается в использовании порошков в качестве исходного сырья, которые затем формуют в изделия заданной формы и подвергают термической обработке (спеканию) при температурах ниже температуры плавления основного компонента шихты [30]. Методы ПМ могут с успехом быть использованы для получения антифрикционных композиционных материалов из элементов, плотность которых значительно отличается. С помощью ПМ гораздо легче добиться равномерного распределения структурных составляющих по объёму матричного материала по сравнению с литьевыми методами. Это достигается за счет создания структуры с требуемыми распределением и дисперсностью включений на стадии формирования прессовки. При этом последующее спекание позволяет укрепить связь между частицами матрицы.

Основными элементами технологии ПМ являются следующие:

а) получение порошков исходных материалов, представляющие собой чистые металлы или их сплавы, соединения металлов с неметаллами и др.;

б) предварительная обработка, заключающаяся в большинстве случаев в отжиге, расфеве, развеске и смешивании. Стоит отметить, что смешивание является одной из самых ответственных операций, поскольку свойства спеченных изделий во многом зависят от того, насколько равномерно в результате смешивания были распределены компоненты шихты;

в) прессование из шихты изделий, заданных размеров в специальных пресс-формах, т.е. формование будущего изделия;

г) термическая обработка или спекание прессованных изделий, придающие им окончательные физико-механические и другие специальные свойства;

д) дополнительная обработка спеченных изделий, целью которой могут быть: дальнейшее повышение физико-механических свойств, защита поверхности изделий от коррозии, нанесение декоративных покрытий, придание изделиям окончательных размеров и формы.

В производственной и исследовательской практике иногда встречаются отклонения от приведенных стадий технологии ПМ. В качестве примеров можно привести совмещение операций прессования и спекания, пропитку пористого брикета расплавленными металлами.

В последнее время активно развивается методика, позволяющая создавать объемные объекты с помощью 3D-принтеров. Технологии селективного лазерного спекания и сплавления, применяющие в качестве исходного сырья порошки, позволяют изготавливать модели и изделия сложной внутренней конфигурации, которые очень трудно создать с помощью других методов. Однако, используемое оборудование, позволяющее изготавливать детали нужной формы, является очень дорогостоящим.

Поскольку спекание является наиболее сложным и важным технологическим процессом ПМ [31], то остановимся на нем более подробно. Согласно определению по ГОСТ 17359-82: спекание есть нагрев и выдержка порошковой формовки при температуре ниже точки плавления основного компонента с целью обеспечения заданных механических и физико-химических свойств. Возможны две основные разновидности процесса спекания: твердофазное, т.е. без образования жидкой фазы, и жидкофазное, при котором легкоплавкие компоненты смеси порошков расплавляются.

Основные закономерности твёрдофазного спекания порошковых тел были выявлены на однокомпонентных порошках. Основной особенностью поведения порошкового тела при спекании является уплотнение в результате уменьшения пор (усадка). Существуют следующие механизмы транспорта

вещества при спекании: поверхностная диффузия; объемная диффузия; перенос через газовую фазу; вязкое течение и течение, вызываемое внешними нагрузками (для спекания под давлением, горячего прессования и др.) [32].

Считается, наличие жидкой фазы при спекании положительно сказывается на усадке порошковых тел. Однако среди металлов существуют бинарные системы, в которых появление жидкой фазы при спекании сопровождается ростом порошковых тел [13]. Причина роста частиц при диффузии в них атомов из жидкой фазы – это увеличение массы частиц в условиях, когда переход атомов в обратном направлении, из твердой фазы в жидкую, практически отсутствует.

Спекание происходит в несколько стадий. Принято выделять три стадии [30]:

1. Припекание порошинок друг к другу. Образование металлических контактов (перемычек или мостиков) происходит прежде всего вследствие восстановления окисных пленок на поверхности частиц, поскольку при этом атомы порошинок обладают повышенной диффузионной активностью. При этом сохраняется структурная граница между частицами;

2. Исчезновение границ между частицами;

3. Появление замкнутых изолированных пор. Они могут уменьшаться, что приводит к уплотнению порошкового тела.

Как известно, наибольший практический интерес представляют материалы (в частности антифрикционные), полученные спеканием многокомпонентных порошковых тел. Здесь нужно рассматривать два случая: спекание в твердой фазе и спекание в присутствии жидкой фазы. Образующиеся при спекании смесей разнородных порошков фазы определяются диаграммой равновесия фаз. Принято различать два вида твердофазного спекания многокомпонентных систем: 1) спекание компонентов с полной (неограниченной) взаимной растворимостью; 2) спекание компонентов с ограниченной взаимной растворимостью.

Для получения композиционных материалов с низкой пористостью спекание проводят в условиях, когда легкоплавкий компонент образует жидкую фазу и обладает хорошей смачиваемостью твердого компонента [32].

Необходимо отметить, что припекание разнородных тел является сложным процессом, поскольку одновременно с самодиффузией, которая обуславливает перенос массы в область приконтактного перешейка, происходит гетеродиффузия, которая обеспечивает выравнивание концентраций разноименных атомов по объему тела. В отличие от спекания однокомпонентных систем, где диффузионные процессы, обычно, способствуют уплотнению, гетеродиффузия в многокомпонентных системах может приводить также к торможению процесса усадки и объемному росту порошкового тела [32]. Так, для спекания смесей, компоненты которых полностью растворимы друг в друге, характерно наличие эффектов, связанных с диффузионным ростом, возникающем при взаимной диффузии в результате неравенства парциальных коэффициентов диффузии, и приводящим к появлению избыточных вакансий и развитию диффузионной пористости – эффекта Френкеля.

Основные причины нарушения монотонного хода кривых, которые характеризуют усадку, как функцию времени или температуры спекания, являются: наличие пленок невосстанавливающихся окислов; снятие упругих напряжений, возникающих при прессовании; наличие фазовых превращений и выделение газов.

Стоит упомянуть, что большое влияние на ход усадки оказывают пленки окислов на поверхности частиц. Если процессы поверхностной диффузии тормозятся пленкой невосстанавливающихся окислов, то усадка не только полностью отсутствует, но при достаточно высоких температурах может наблюдаться рост спекаемых брикетов. В связи с этим, при прессовании исходных брикетов, например из алюминиевых порошков, одной из задач является разрушение покрывающей их оксидной пленки за счет трения между соседними частицами. Чем меньше размер таких порошинок, тем большая их

площадь будет свободна от окислов, а, следовательно, спеченные брикеты будут обладать меньшей пористостью.

Среди основных достоинств технологии порошковой металлургии также стоит отметить следующие:

1. простота изготовления получаемых материалов;
2. Значительная экономия металла в связи с возможностью прессования изделий с окончательными размерами; отходы при этом составляют всего 1-5%, потери же металла при обычных методах изготовления могут достигать до 80%;
3. Возможность получения материалов высокой чистоты, ибо технология порошковой металлургии не приносит, в отличие от литья, никаких загрязнений в изготавливаемый материал.

Стоит отметить, что экономическая выгода применения методов ПМ проявляется только при больших масштабах производства. Однако уникальные свойства получаемых изделий часто оправдывают целесообразность их изготовления и значительно меньшими партиями [33].

### **1.3 Методы деформационной обработки**

Пластическая обработка композиционных материалов может проводиться различными методами, в том числе и путём их интенсивной пластической деформации (ИПД). В результате обработки композиты упрочняются не только за счёт упрочнения матрицы вследствие увеличения в ней плотности дислокаций, но и за счёт изменения формы и характера распределения фазовых включений. Среди наиболее распространенных методов ИПД обработки можно выделить монотонные типа прокатки,ковки или экструзии и немонотонные, например, равноканальное угловое прессование. В результате полученные *in situ* композиционные материалы могут обладать исключительными механическими и функциональными свойствами, например, их прочность оказывается значительно выше, чем предсказывает правило идеальной смеси [34-36].

Если в процессе деформационной обработки композитов обеспечивается однородность течения материала, то есть, отсутствует локализация деформации в одной из фаз, то отдельные части образца будут испытывать такую же деформацию, как и сам образец. Следовательно, характер изменения формы структурных элементов композиционных материалов при ИПД будет определяться только действующей схемой деформирования.

Из монотонных методов ИПД чаще применяют прокатку и экструзию. Так, при прокатке испытанная материалом истинная деформация будет определяться как:

$$\eta = \ln\left(\frac{H_0}{H}\right) \quad (1.1),$$

где  $H_0$  и  $H$  – начальная и конечная толщина прокатываемой полосы [34]. В случае обработки экструзией истинная деформация определяется как:

$$\eta = 2 \ln\left(\frac{F_0}{F}\right) \quad (1.2),$$

где  $F_0$  и  $F$  – исходный и текущий диаметр деформируемой заготовки [34]. Видно, что в любом случае, с увеличением степени деформации площадь поперечного сечения обрабатываемых заготовок уменьшается.

Для оценки эффективности того или иного вида обработки часто возникает необходимость сравнить между собой испытанные материалом истинные деформации. В качестве эталонной используют деформацию одноосным растяжением, а приравненную к ней истинную деформацию называют приведённой деформацией  $\eta_e$ . Так, при экструзии истинная деформация соответствует приведенной деформации ( $\eta_e = \eta$ ). В случае прокатки приведенную (эффективную) деформацию можно определить с помощью соотношения Мизеса:  $\eta_e = (2/\sqrt{3})\eta$  [37]. То есть, при равном утонении образцов испытанная материалом деформация в случае экструзии будет в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем при прокатке.

Наоборот, задавая величину  $\eta_e$  и способ обработки, можно определить конечные размеры образцов. Так, толщина полосы при прокатке с увеличением  $\eta$  будет меняться, согласно выражению 1.1, по следующему закону:

$$H = H_0 e^{-\frac{\sqrt{3}\eta e}{2}}, \quad (1.3)$$

а диаметр прутка после экструзии будет определяться как:

$$F = F_0 e^{-\frac{\eta}{2}}. \quad (1.4)$$

При однородном распределении деформации по объёму композита размеры отдельных структурных составляющих будут меняться по тому же закону, как и у образца в целом. Следовательно, значительное изменение размеров включений прокаткой и экструзией будет сопровождаться сильным утонением обрабатываемых заготовок. Как следствие, они становятся малопригодными для практического применения, что является существенным недостатком монотонных методов ИПД, хотя эффект их на структуру и механические свойства материалов может быть значительным.

Так, в работе [34] было показано, что в ходе обработки экструзией и ковкой сплава Al-20(об.%)Sn осесимметричная деформация приводит к формированию матричной структуры с вытянутыми оловянными включениями. С увеличением степени деформации толщина оловянных включений и расстояние между ними непрерывно уменьшаются. Результатом этой обработки являлось также значительное упрочнение исследуемого сплава. Полученные значения предела его прочности  $\sigma_B$  были значительно выше по сравнению с упрочненным в тех же условиях чистым алюминием, и их зависимость от истинной деформации  $\eta$  носила экспоненциальный характер.

Как и в случае [34], при деформировании холодной прокаткой сплавов Al-Sn, содержащих до 20 об.% олова [38], толщина оловянных прослоек и расстояние между ними также уменьшались с увеличением степени деформации, а прочность исследуемых материалов при  $\eta > 5$  резко возрастала и график зависимости  $\sigma_B(\eta)$  носил экспоненциальный характер.

**Всесторонняя ковка.** Схема данного метода представлена рисунке 1.1. Метод основан на многократном повторении операции свободнойковки: осадка-протяжка со сменой оси прилагаемого деформирующего усилия. Однородность деформации по данной схеме по сравнению с РКУ-прессованием или кручением



ниже. Однако этот метод позволяет получить наноструктурное состояние в достаточно хрупких материалах, поскольку обработка начинается с повышенных температур и применяются небольшие удельные нагрузки на инструмент [35].

Так как заготовка практически не изменяет свою форму и размеры при ковке, большие деформации накапливаются в процессе данной обработки. Использование схемы всестороннейковки важно не только для достижения больших степеней деформации, но и для получения специфического деформационного пути, благоприятного для измельчения зерен.

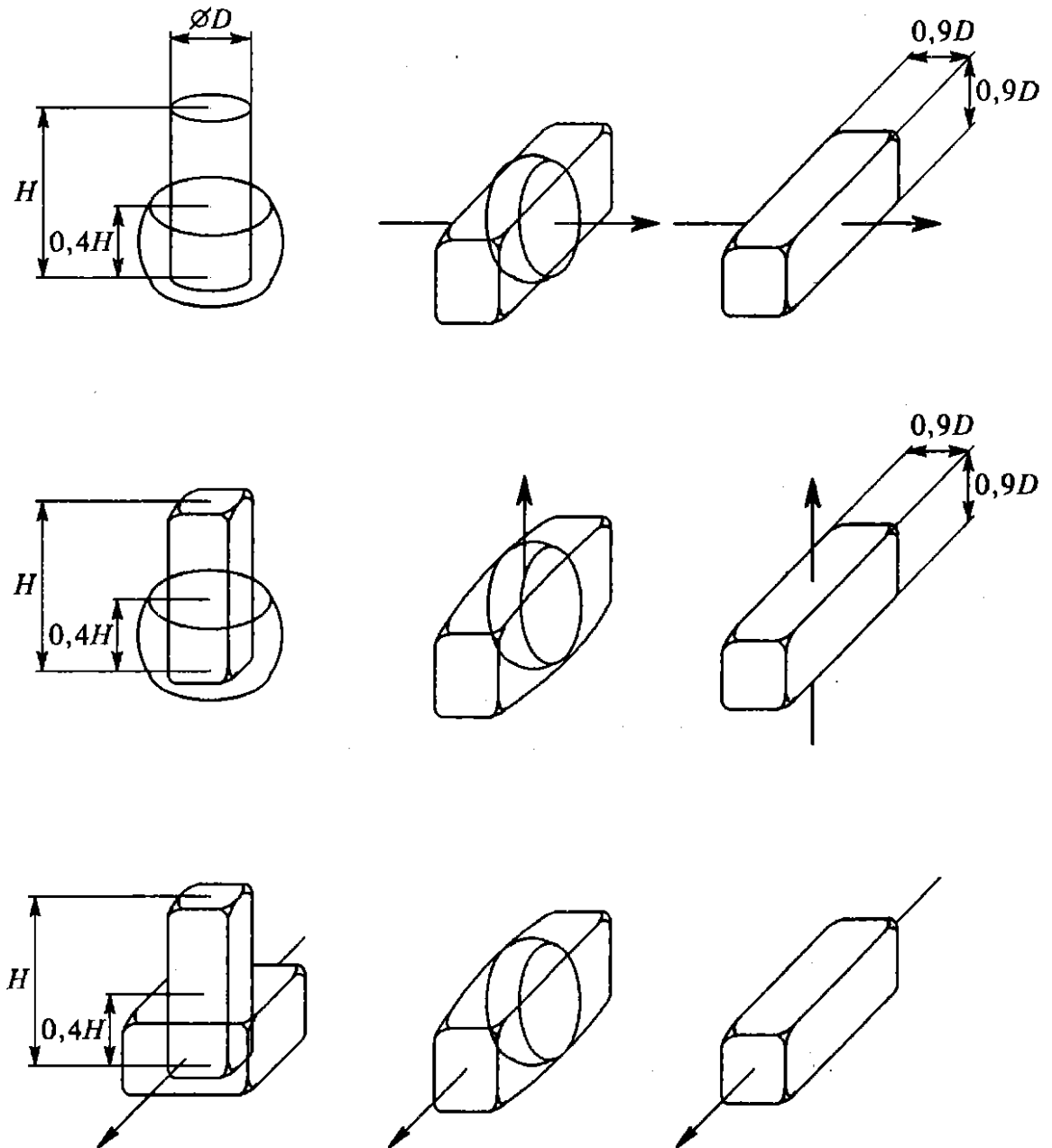


Рисунок 1.1 – Технологическая схема объемнойковки

**Винтовая экструзия (twist extrusion).** Суть метода заключается в интенсивных сдвиговых деформациях, полученных путем прессования призматических заготовок через матрицу с винтовым каналом, сечение которого, ортогонально к оси прессования, постоянно вдоль этой оси. Поскольку форма заготовки после прохождения канала не меняется, то прессование можно повторять многократно до получения требуемой степени деформации. Величина деформации сдвига за один проход составляет  $\gamma \sim 2$  [39]. Из недостатков отмечается формирование анизотропной структуры, которая приводит к сильному разбросу механических свойств.

Для того чтобы избежать значительного изменения размеров деформируемых заготовок, в последнее время вместо традиционных монотонных методов обработки широко используют так называемые немонотонные методы ИПД [40], например, деформация кручением под высоким давлением.

**Кручение под высоким давлением.** Конструкция установки для деформации кручением является развитием идеи наковальни Бриджмена. В этом методе образец помещается между бойками и сжимается под большим давлением  $P$  в несколько ГПа. При этом нижний боек вращается, заставляя образец деформироваться сдвигом за счет сил поверхностного трения. Полученные образцы имеют форму диска.



Рисунок 1.2 – Схема метода кручения под высоким давлением

Для расчета степени деформации используется следующее соотношения

$$\varepsilon = \ln(\vartheta r/l), \quad (1.5)$$

Где  $\vartheta$  – угол вращения в радианах, а  $r$  и  $l$  – радиус и толщина диска соответственно.

Большие степени деформации достигаются путем сдвиговой деформации в результате изменения угла поворота нижнего бойка. Поэтому в данном методе при расчете степени деформации в данном методе часто используют формулу

$$\gamma = 2\pi RN/l, \quad (1.6)$$

Где  $R$  – расстояние от оси образца в форме диска,  $N$  – число оборотов,  $l$  – толщина диска

Согласно с выражениями (1.5) и (1.6) в центре образцов, подвергнутых деформации кручением не должно происходить существенного измельчения микроструктуры, однако в действительности происходит формирование однородной структуры по диаметру образцов. Из этого следует, что

рассчитанные с помощью данных уравнений величины деформации лишь примерно равны реальным степеням деформации. Более того, структура формируется под действием не только внешних, но и внутренних напряжений. В связи с этим в ходе деформации кручением более правильно рассматривать число оборотов, а не величину деформации, рассчитанную аналитически.

Правда, размеры обрабатываемых при кручении образцов не велики, и в этой связи, метод равноканального углового прессования (РКУП), предложенный в 70-х годах В.М. Сегалом [36] и далее развитый Р.З. Валиевым, обращает на себя особое внимание. При его использовании, как и при кручении, материал испытывает деформацию по схеме простого сдвига [41], однако размеры обрабатываемых образцов определяются параметрами каналов пресс-формы и могут варьироваться в широком диапазоне. Помимо повышения прочности композиционных материалов, метод позволяет также управлять формой их фазовых включений за счет выбора различных маршрутов прессования.

Пресс-формы для РКУП характеризуются значениями внешнего  $\psi$  и внутреннего  $2\varphi$  углов пересечения каналов (рисунок 1.3). Когда угол  $\psi = 0^\circ$ , а  $2\varphi$  произволен все части прессуемого образца (в случае, если течение деформируемого материала протекает однородно) в момент прохождения ими плоскости пересечения каналов  $OO'$  испытывают деформацию по схеме простого сдвига с интенсивностью  $\gamma$ :

$$\gamma = 2ctg\varphi. \quad (1.7)$$

Если внутренний угол пересечения каналов составляет  $90^\circ$  ( $\varphi = \pi/4$ ), то при каждом проходе материал испытывает деформацию  $\gamma \approx 2$  [44].

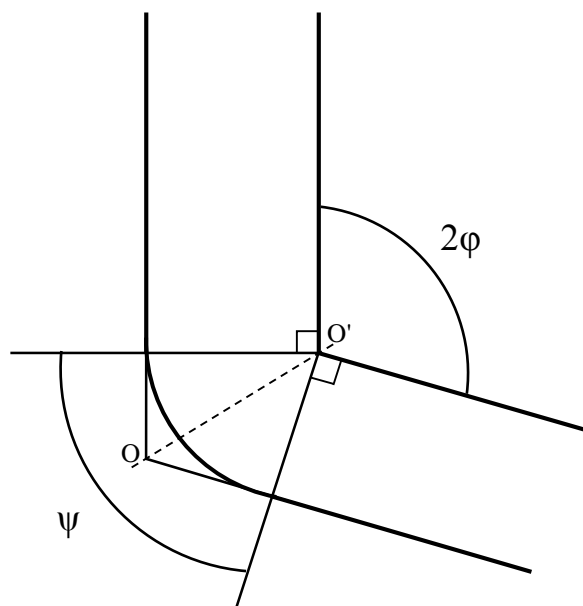


Рисунок 1.3 – Геометрическая схема РКУП

Взяв в качестве оценки приведенную деформацию  $\eta_e$ , с помощью соотношений Мизеса получим, что за одно прессование:

$$\eta_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg}(\varphi). \quad (1.8)$$

Поскольку в нашем случае  $\varphi = \pi/4$ , то  $\eta_e \approx 1,15$ . При многократном прессовании общая степень деформации будет определяться как:

$$\varepsilon_N = N\eta_e, \quad (1.9)$$

где  $N$  – число проходов.

Наиболее эффективными параметрами, влияющими на степень однородности пластического течения деформируемых материалов при РКУП, являются противодавление и температура прессования [43]. Противодавление способствует увеличению трещиностойкости образцов, и его оптимальное значение составляет приблизительно  $1,6 \tau$ , где  $\tau$  – критическое напряжение сдвига деформируемого материала. Повышенная температура РКУП способствует релаксации внутренних напряжений до значений ниже критических, вызывающих растрескивание материала.

Из (1.9) следует, что величина накопленной материалом деформации не зависит от маршрута прессования, а форма включений, то есть макроструктура композиционных материалов, зависит. Отличия маршрутов РКУП показаны на

рисунке 1.4. При первом РКУП произвольный сферический участок деформируемого образца в результате простого сдвига в месте пересечения каналов приобретает форму эллипсоида. При последующих РКУП по маршруту А ориентация заготовки остается неизменной, но направление сдвига при каждом прессовании меняется на угол  $2\varphi$  (рисунок 1.4а). В результате, эллипсоид в плоскости течения материала будет утоняться и вытягиваться с увеличением числа проходов [35].

При реализации РКУП по маршруту В заготовка после каждого прохода поворачивается вокруг своей продольной оси на угол  $90^\circ$ . Такое прессование подразделяют на два самостоятельных маршрута: В<sub>А</sub>, когда вращение образца осуществляется в переменном ( $\pm 90^\circ$ ) направлении и В<sub>С</sub>, когда вращение происходит в постоянном направлении ( $+90^\circ$ ).

В ходе реализации деформирования по маршруту С после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол  $180^\circ$ . В этом случае сдвиг при повторном проходе реализуется в той же плоскости, но в противоположном направлении. Следовательно, при идеальном течении материала форма исходного сферического участка должна восстанавливаться каждое четное прессование [35].

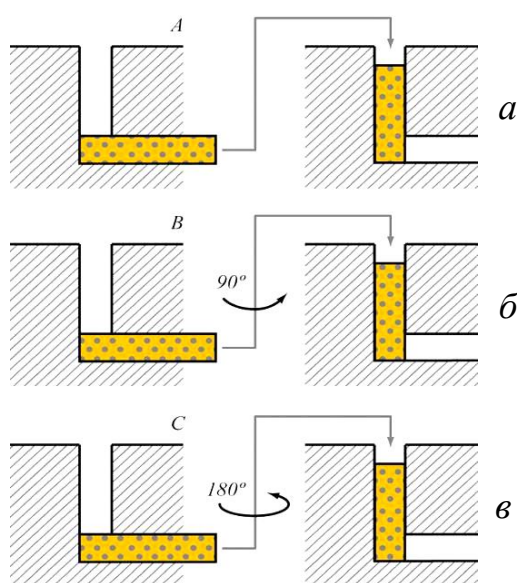


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение методов РКУП: а – маршрут А; б – маршрут В; в – маршрут С [37]

Среди недостатков метода РКУП стоит отметить неоднородность распределения деформации по длине обрабатываемого образца, из-за того, что по торцам его в ходе продавливания через пресс-форму образуются призматические области, которые не пересекают плоскость сопряжения каналов и не деформируются (концевой эффект) [44]. Так как величина испытанной этими областями деформации меньше по сравнению с основным материалом, то их присутствие делает структуру по длине образца неоднородной, особенно в случае относительно коротких образцов. Согласно схемам деформирования (рисунок 1.4), концевой эффект наиболее сильно будет сказываться при РКУП по маршрутам А и В<sub>А</sub>.

РКУП широко применяется для эффективного упрочнения пластичных поликристаллических материалов за счёт измельчения их зеренной структуры. Однако для обработки композиционных материалов его практически не применяют, поскольку метод подвергает их деформациям большой интенсивности (1.9), что приводит к возникновению на границах фаз дополнительных напряжений, вызывающих растрескивание образцов с недостаточно пластичными фазами.

В случае композиционных материалов системы Al-Sn ситуация иная, поскольку они относятся скорее к композитам с дисперсной второй фазой [34], у которых пластична не только матрица, но и содержащиеся в ней включения. Более того, олово является легкоплавким металлом, поэтому даже при комнатной температуре возникновение критических напряжений внутри и на поверхности оловянных частиц вряд ли возможно. В то же время, олово несжимаемо, в отличие от пор, и при интенсивной деформации его включения будут выполнять функцию подпора, поддерживая в деформируемом материале высокое гидростатическое давление, препятствующее зарождению в нем несплошностей и трещин.

## **2 Используемые материалы и методы их исследования**

### **2.1. Исходные материалы, методы изготовления образцов**

#### **и измерения их механических свойств**

Образцы для исследований были получены спеканием прессовок из смесей порошков олова и алюминия с различным содержанием кремния. Для составления смесей использовали следующие порошки:

- Порошок алюминиевый высокодисперсный марки АСД-4 (ТУ 48-5-226-87). Гранулометрический состав: от 20 до 30 мкм – не более 12 %, от 30 до 50 мкм – не более 3 %, менее 50 мкм – 99,6 %.
- Порошок олова марки ПО 2 (ГОСТ 9723-73). Гранулометрический состав: < 45 мкм – не менее 80 %; > 71 мкм – не более 2,2 %. Содержание примесей в порошке – (Fe, Pb, Cu, S, O<sub>2</sub>, Sb, Bi, As) – не более 1 %.
- Порошки распылённого Al-сплава с различным содержанием кремния с размеров частиц < 80 мкм.

Из исходных порошков готовились механические смеси, весовое содержание олова в которых составляло 40 %, а содержание кремния 0,5%, 12% и 23 %. Структура данных порошков приведена на рисунке 2.1. Смешивание проводилось в смесителе типа «шаровая мельница» в течение 5-6 часов, затем порошки просеивались через сито с размером ячейки 80 мкм.

Далее, из полученных смесей с помощью холодного прессования на машине МС 500 (Рисунок 2.2) формировались образцы диаметром 20 мм и высотой 9 мм и с размерами 60x10x10 мм для РКУП. Пористость сырых образцов составляла  $\approx 10$  %. Поперечные размеры образцов для РКУП соответствовали сечению каналов пресс-формы для РКУП. Прессование осуществлялось в стальной пресс-форме, боковые стенки которой для предотвращения задиров перед засыпкой порошка покрывались тонким слоем смеси мазута с графитом. Прессование производилось по ограничителям с рассчитанной высотой.



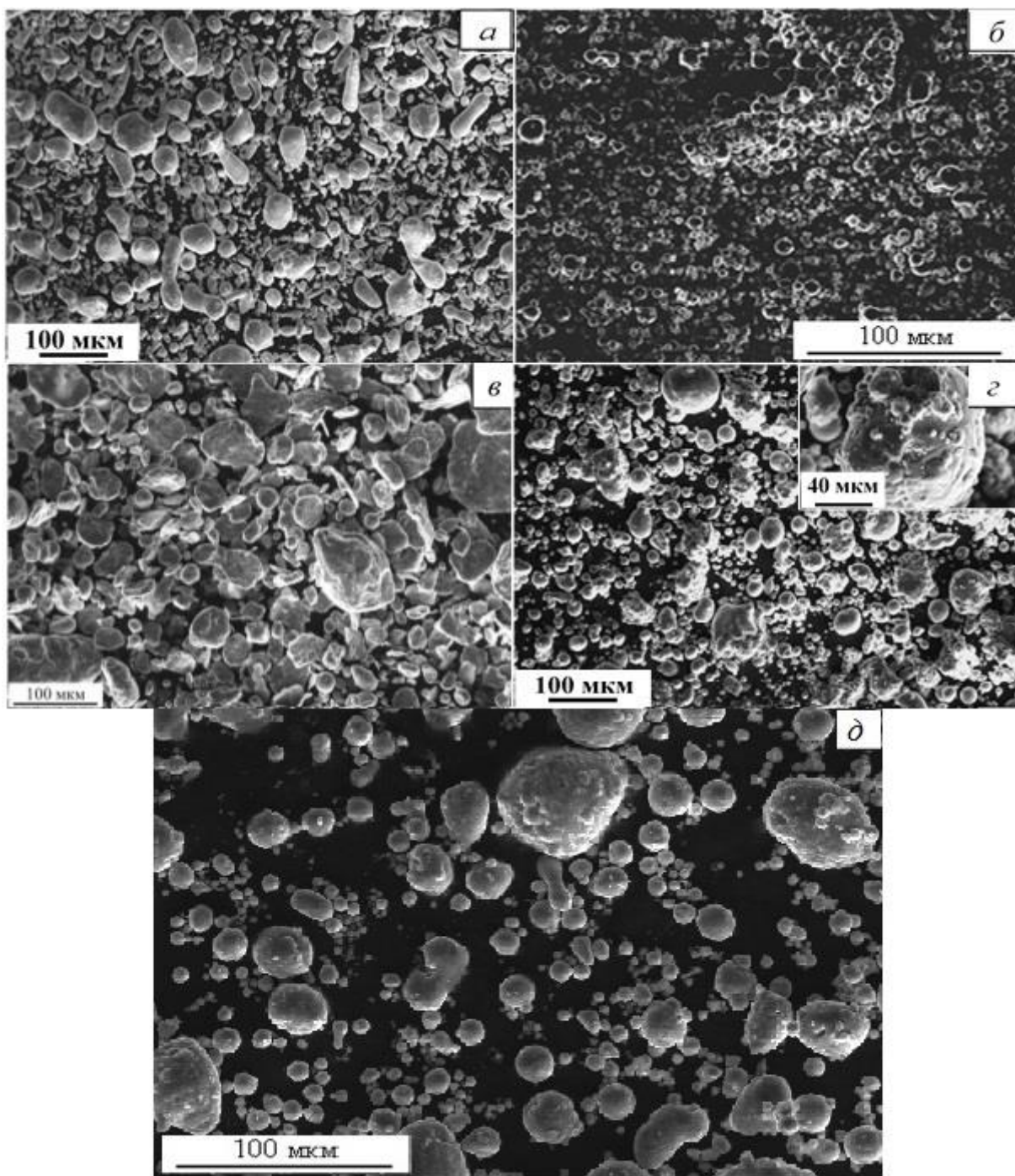


Рисунок 2.1 – Исходные порошки: Sn (ПО 2) (а), Al АСД-4 (б), Al-0,5 вес.%Si (в), Al-12 вес.%Si (г), Al-23 вес.%Si (д).



Рисунок 2.2 – Пресс машина МС-500

Спекание холоднопрессованных образцов проводилось в вакууме не ниже  $10^{-2}$  Па в электропечи СНВЭ-1.3.1/16 (Рисунок 2.3) Температура спекания для образцов Al-40Sn и (Al-0,5Si)-40Sn составляла 600 °С, а оптимальное время выдержки – 1 час. В случае композита (Al-12Si)-40Sn и (Al-23Si)-40Sn спекание проводилось при 570 °С, во избежание оплавления образцов, с предварительной выдержкой в течение одного часа при 550° С.



Рисунок 2.3 – Электропечь СНВЭ-1.3.1/16

Объем (V) исследуемых образцов определялся до и после спекания по результатам измерения их линейных размеров. Масса образцов (m) определялась с помощью аналитических весов с точностью до 0,001 г, а их плотность рассчитывали по формуле:

$$\rho_{\text{обр}} = \frac{m}{V}. \quad (2.1)$$

Пористость (П) сырых и спеченных образцов определялась согласно следующему выражению:

$$П = \left(1 - \frac{\rho_{\text{обр}}}{\rho_{\text{теор}}}\right) * 100\%, \quad (2.2)$$

где  $\rho_{\text{обр}}$  – плотность образца;

$\rho_{\text{теор}}$  – теоретическая плотность, рассчитанная для материала исследуемого состава, не содержащего пор.

Значение  $\rho_{\text{теор}}$  для смесей порошка алюминиевого сплава и олова рассчитывалось по правилу аддитивности:

$$\rho_{\text{теор}} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\alpha_1 \rho_2 + \alpha_2 \rho_1}, \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – весовая концентрация соответствующего порошкового компонента (вес. %);

$\rho_i$  – справочная плотность (г/см<sup>3</sup>) чистого олова или сплава Al-Si.

В случае образцов, которые за счёт выпотевшего олова теряли массу при спекании, их теоретическая плотность пересчитывалась с учётом потери массы. Результаты расчётов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Теоретическая плотность (г/см<sup>3</sup>), использованная для расчета пористости сырых и спеченных композитов (Al-Si)-Sn

Состав алюминиевой матрицы	Концентрация Sn, вес. %.	
	0	40
Al	2,71	3,61
(Al-0,5Si)	2,7	3,61
(Al-12Si)	2,65	3,54
(Al-23Si)	2,6	3,1

Прочность антифрикционных композиционных материалов (Al-Si)-Sn определялась испытанием их на сжатие (ГОСТ 25.503-97) с помощью универсальной испытательной машины Walter+Bai AG LFM-125 (Рисунок 2.4) Скорость нагружения образцов составляла 0,5 мм/мин. Образцы призматической формы вырезались из средней части спечённых заготовок и имели размеры 5x5x10 мм. Для предотвращения влияния трения на торцевые части образцов наносился порошок графита. Для каждой точки проводилось не менее трех испытаний.



Рисунок 2.4 – Универсальная испытательная машина Walter+Bai AG LFM-125

Изменение площади образцов в процессе осадки учитывалось согласно следующему соотношению:

$$S = \frac{S_0}{(1-\delta)}, \quad (2.4)$$

Где  $S_0$  – исходная площадь образца;

$\delta$  – линейная деформация.

Прочность материалов после РКУП определяли сжатием образцов вдоль оси, направление которой совпадало с продольной осью прессованной заготовки.

Горячее доуплотнение (ГД) производилось в исходной пресс-форме при температуре 200 °С. Усилие допрессовки составляло 10 тонн.

Для интенсивной пластической деформации спеченных композитов (Al-Si)-Sn был выбран метод равноканального углового прессования (РКУП), поскольку он позволяет подвергать образцы значительным деформациям без изменения их поперечных размеров, а также управлять формой структурных составляющих композита за счет выбора маршрута прессования [41,44].

Для прессования использовалась пресс-форма из стали 40Х твердостью ~ 50 НRc, со специально разработанной конструкцией, позволяющей, не вынимая образцов, проводить многократное их прессование (Рисунок 2.5) [45].

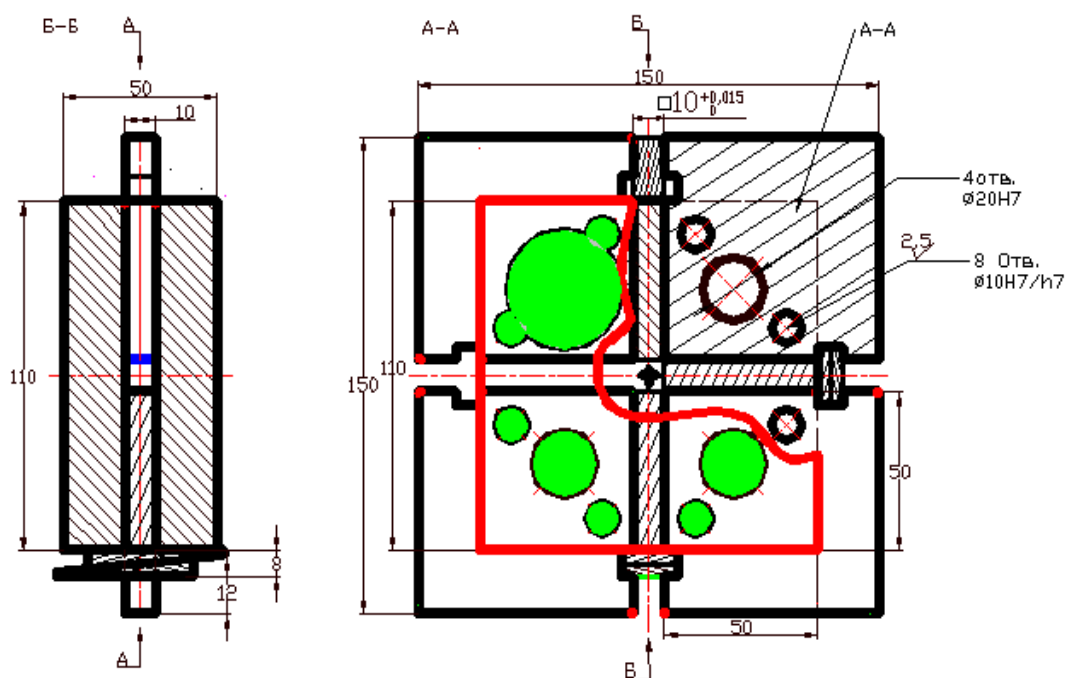


Рисунок 2.5 – Схема пресс-формы для РКУП

Для уменьшения трения стенки каналов пресс-формы покрывались тонким слоем смазки состоящей из смеси мазута с графитом. Пресс-форма с помещенными в нее образцами нагревалась перед прессованием в электрической печи СНОЛ (Рисунок 2.6). Выдержка составляла – 15 минут при температуре нагрева 200 °С.



Рисунок 2.6 – Электрическая печь СНОЛ

## 2.2. Исследование структуры композитов (Al-Si)-Sn

Металлографические исследования структуры спеченных и деформированных материалов проводились на оптическом микроскопе AXIOVERT-200MAT (Zeiss, Германия) Рисунок 2.7.

Так как разрешающая способность оптических микроскопов (ОМ) не превышает 0,2 мкм, то для более детального исследования структуры спеченных и деформированных композитов (Al-Si)-Sn также применялась растровая электронная микроскопия (РЭМ) [25]. Для РЭМ исследования использовался на микроскоп LEO EVO 50 (Карл Цейс, Германия), разрешающая способность которого составляет 30 нм (Рисунок 2.8). Микроскоп дополнительно оснащён

встроенным микроанализатором, с помощью которого определялся элементный состав образцов.



Рисунок 2.7 – Оптический микроскоп AXIOVERT-200 MAT



Рисунок 2.8 – Микроскоп LEO EVO 50

Шлифы для металлографических исследований образцов готовились путём шлифования секущей поверхности на наждачной бумаге с убывающей зернистостью абразива, а затем на сукне с нанесённой на него алмазной пастой. Шлифование проводилось на полировальном станке MECAPOL P 230 (Рисунок 2.9). Шлифованную поверхность подвергали химическому травлению в 4 % растворе азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  в спирте.



Рисунок 2.9 – Полировальный станок MECAPOL P 230

### 2.3. Трибологические испытания композитов (Al-Si)-Sn

Наиболее полно антифрикционные свойства материалов проявляются в отсутствие жидкой смазки на контакте, поэтому испытания спеченных и деформированных композитов (Al-Si)-Sn проводились в условиях сухого трения по стали по схеме «палец – диск» на триботестере фирмы «Tribotechnic» (France) (Рисунок 2.10).



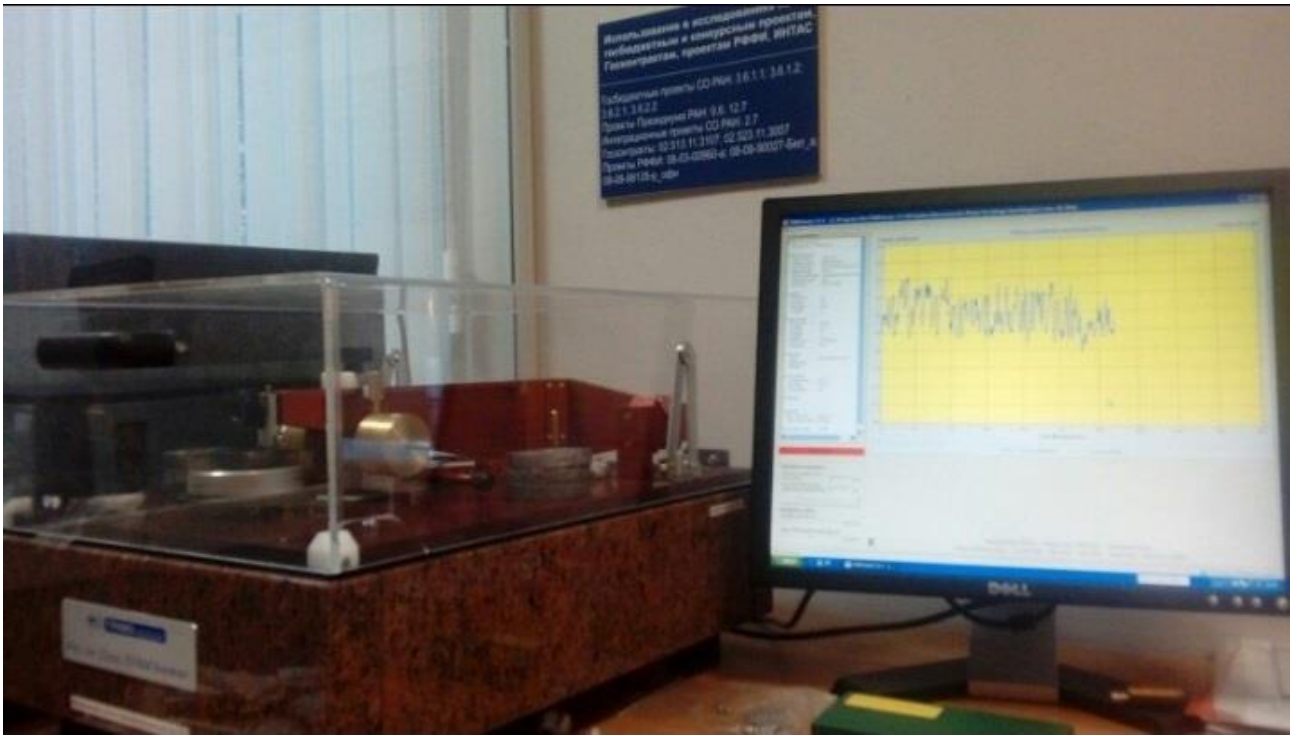


Рисунок 2.10 – Триботестер фирмы «Tribotechnic»

Образцы для испытаний представляли собой прямоугольные параллелепипеды с площадью рабочей поверхности  $9 \text{ мм}^2$ . В качестве контртела использовались диски диаметром 80 мм, изготовленные из закаленной стали Ст. 45 с твердостью 45-47 НРС. Рабочая поверхность образцов шлифовалась по схеме, использованной при подготовке шлифов для металлографических исследований. Рабочая поверхность диска полировалась на сукне с использованием алмазной пасты с размерами частиц 1-3 мкм. Для устранения загрязнений, рабочие поверхности образца и диска перед испытанием протирались ватным тампоном, смоченным ацетоном.

Нагрузка на поверхность трения образцов составляла 1, 3 и 5 МПа, а скорость скольжения 0,6 м/с. Величина силы трения регистрировалась автоматически каждую секунду встроенным микропроцессором. Для деформированных методом РКУП образцов поверхностью трения служила плоскость течения материала, а направление трения выбиралось поперек вытянутых оловянных включений. Длина пути притирки всех образцов составляла 1000 м. Интенсивность изнашивания исследуемых материалов определялась соотношением:

$$I_h = \frac{\Delta l}{L}, \quad (2.7)$$

где  $\Delta l$  – относительное укорочение образца в мкм;

$L$  – путь трения, который для всех испытаний составлял 500 м.

Исследование структуры и состава поверхности трения образцов и стального контртела осуществлялись с помощью методов ОМ и РЭМ.

Основной объём структурных исследований проводился на оборудовании ЦКП ИФПМ СО РАН.

### 3. Результаты работы

#### 3.1. Влияние состава порошковой смеси и режима ее спекания на структуру, механические и трибологические свойства композитов (Al-Si)-40Sn

В качестве прототипа исследуемого материала был выбран полученный ранее спечённый сплав Al-40Sn [2], за счёт высокого содержания олова демонстрирующий при сухом трении более высокое сопротивление истиранию по сравнению с промышленными сплавами этой же системы. Соединение составляющих новый композит фаз осуществлялось путём жидкофазного спекания смеси из 40 вес. % порошков олова с порошками сплавов Al-Si с различным содержанием кремния. Поскольку, как и алюминий, кремний малорастворим в твёрдом олове, то предполагалось, что таким образом возможно получение плотного материала, без заметного ухудшения смазывающих способностей оловянной фазы.

Создание высокоплотных композитов «алюминиевый сплав»-Sn спеканием осложняется тем, что исходные порошки алюминиевых сплавов и олова покрыты прочными оксидными пленками, которые препятствуют не только растеканию жидкой фазы по прессовке и смачиванию алюминиевых порошинок оловом, но также их свариванию между собой. Поэтому для повышения реакционной способности алюминиевые порошки были подвергнуты предварительному механическому размолу в шаровой мельнице.

Как показали эксперименты по спеканию порошков сплавов (в отсутствие олова), даже после помола они начинают активно свариваться между собой только при температурах спекания выше 600 °С. Ранее [16] было установлено, что в случае спекания порошков чистого алюминия (АСД-4) при температуре 640 °С удастся получить композит с пористостью менее 1 %. В случае спекания порошков доэвтектического сплава Al-0,5Si после часовой выдержки при 615 °С пористость брикета снизилась до 8 % (исходная – около 10 %). При этом поры в основном располагались в местах тройных и четверных

стыков частиц. При повышении температуры спекания до 640 °С большая часть пор исчезает, и остаточная пористость образца Al-0,5Si составила 0,8 % (таблица 3.1).

В случае спекания брикетов из порошка эвтектического состава проводить нагрев до температур выше 577 °С нельзя, ввиду их полного расплавления (рисунок 3.1). Спекание же при более низких температурах усадку композитов не вызывало. В случае образцов с большим количеством кремния (Al-23Si) их можно нагревать до значительно более высоких температур. Однако получить высокоплотные композиты в этом случае также не удалось ввиду большой хрупкости сырых брикетов из твердых порошков.

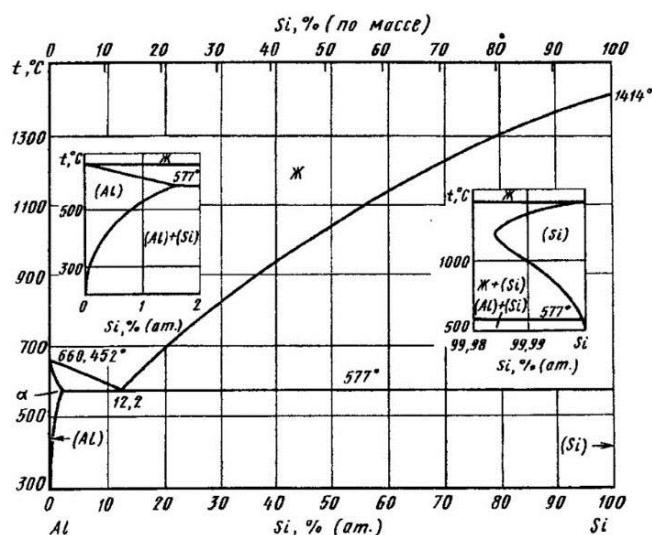


Рисунок 3.1 – Диаграмма состояния Al-Si [46]

Если к порошкам алюминиевого сплава добавить олово, то спекание их будет проходить в присутствии жидкой фазы. Известно, что непременным условием получения беспористых материалов при жидкофазном спекании является хорошее смачивание и растворение твёрдых частиц в жидкой фазе. Олово в жидком состоянии способно растворять алюминий и тем больше, чем выше температура спекания. В результате будет иметь место перекристаллизация частиц алюминия через жидкую фазу, которая существенно влияет на тип формирующейся структуры спеченных композитов.

Так, спекание композитов (Al-0,5Si)-40Sn осуществляли в интервале температур 550-630 °С. Оказалось, что максимально допустимая величина температуры спекания, при которой образцы не теряют форму под собственным весом из-за большого количества жидкой фазы, составляет около 615 °С, что согласуется с равновесной диаграммой состояния Al-Sn.

Обнаружено, что параметры структуры композита (Al-0,5Si)-40Sn меняются с температурой спекания немонотонно (таблица 3.1). Металлографические исследования показали, что характеризующее связанность матрицы число контактов на одну алюминиевую частицу растет с повышением температуры спекания до 600 °С, а затем быстро начинает снижаться. Схожим образом от температуры зависит и пористость исследуемого материала. Так, ее значение для спеченного при температуре 600 °С в течение 1 часа композита (Al-0,5Si)-40Sn составляло 4,5 %. Однако при более высокой температуре спекания их конечная пористость увеличивалась.

Таблица 3.1 – Влияние режима спекания на характеристики структуры и прочность композитов (Al-0,5Si)-40Sn и Al-0,5Si

<b>Состав</b>	<b>Режим спекания</b>	<b>Пористость, %</b>	<b>Напряжение течения (<math>\sigma_4</math>), МПа</b>
Al-40Sn	600°С; 1ч	0,8	62
(Al-0,5Si)-40Sn	570°С; 1ч	11,6	38
–	585° С; 3ч	7,0	46
–	585 °С; 1ч	9,3	43
–	600°С; 1ч	4,5	56
–	615°С; 1ч	10,4	37
Al-0,5Si	615°С; 1ч	8,0	–
–	640°С; 1ч	0,8	–

Указанные структурные изменения объясняются тем, что на их течение влияет не только количество жидкой фазы в образце во время спекания, но и угол смачивания ею частиц твёрдой фазы, а также растворимость и скорость перекристаллизации атомов твёрдой фазы через расплав. При низких

температурах спекания жидкой фазы мало, а угол смачивания Al частиц жидким оловом большой, поэтому Sn плохо проникает на контакты между алюминиевыми частицами. Там, где его не было, часть алюминиевых порошинок срасталась в крупные агломераты, на периферии которых располагались мелкие частицы алюминия, окруженные оловянной сеткой (рисунок 3.2). При этом связанность каркаса из алюминиевых частиц была слабой, а пористость композитов – большой, так как такие мелкие частицы препятствовали перегруппировке и уплотнению крупных агломератов. Поры в таких композитах располагались преимущественно в местах стыков частиц твердой фазы. Было установлено, что увеличение длительности спекания до трех часов при температуре 585 °С привело к незначительному (до 7 %) снижению пористости композита (Al-0,5Si)-40Sn, но к сильному огрублению его структуры за счет растворения мелких частиц и осаждения их на поверхность крупных агломератов.

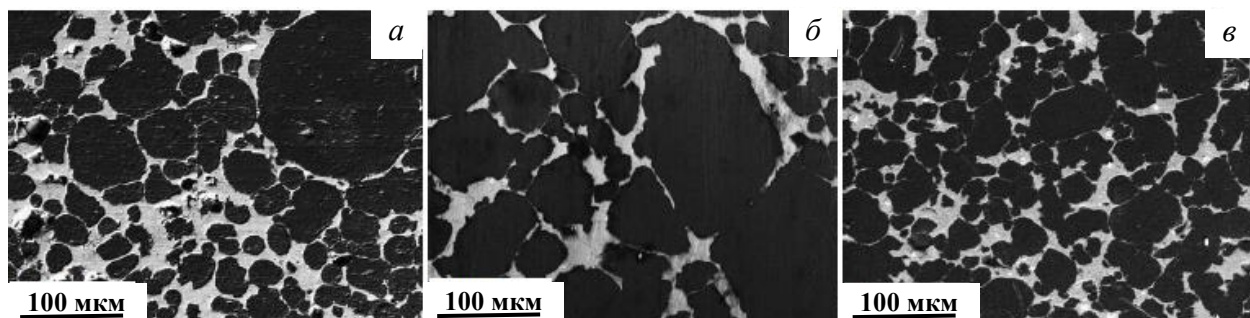


Рисунок 3.2 – Структура спеченного сплава (Al-0,5Si)-40Sn (прослойки олова – светлые). Температура спекания: *a* – 585 °С, *б* – 600 °С, *в* – 615 °С. Время выдержки – 1 час

Увеличение температуры спекания до 600 °С приводит к уменьшению угла смачивания алюминия жидким оловом и проникновению последнего на большинство стыков твердых частиц. Одновременно возрастает растворимость Al частиц в жидкой фазе, а процессы перекристаллизации растворенных атомов через жидкую фазу ускоряются. В результате количество мелких частиц резко убывает. Оставшиеся выходят из зацепления, а под действием капиллярных сил происходит их перегруппировка в более плотную упаковку, и пористость

композитов снижается. При этом угол смачивания между фазами остаётся больше нуля, что позволяет столкнувшимся частицам срастаться. В результате связанность алюминиевого каркаса возрастает. Так, для композита (Al-0,5Si)-40Sn число контактов на Al частицу ( $N_k$ ) составляло 3,4 (таблица 3.1) и было выше его критического значения ( $\leq 2$ ), при котором зёрна твёрдой фазы еще можно считать связанными в непрерывные цепочки.

При увеличении температуры спекания до 615 °C угол смачивания Al частиц жидким оловом убывает практически до нуля, а количество жидкой фазы возрастает. В результате большой объем жидкости препятствует установлению контактов между твердыми частицами, тем самым снижая связанность алюминиевого каркаса. При этом пористость спечённых при 615 °C образцов оказалась выше, чем у композитов, полученных при 600 °C.

Обнаружено, что на начальной стадии спекания брикетов (Al-0,5Si)-40Sn происходит проникновение олова под оксидную пленку и растекание его по поверхности алюминиевых порошков. При этом Sn проникает по границам алюминиевых зерен и фрагментирует порошок на отдельные мелкие частицы. Схожие результаты были получены при спекании образцов из порошков чистого алюминия [16]. Данная стадия длилась более 20 минут в случае спекания композитов (Al-0,5Si)-40Sn, тогда как при спекании брикетов Al-40Sn ее продолжительность была больше (рисунок 3.3). Затем наступает стадия растворения наиболее мелких частиц Al сплава. Их растворение выводит оставшиеся частицы из зацепления и реализуется стадия перегруппировки частиц твердой фазы под действием капиллярных сил в более плотную конфигурацию, с одновременным снижением пористости прессовок.

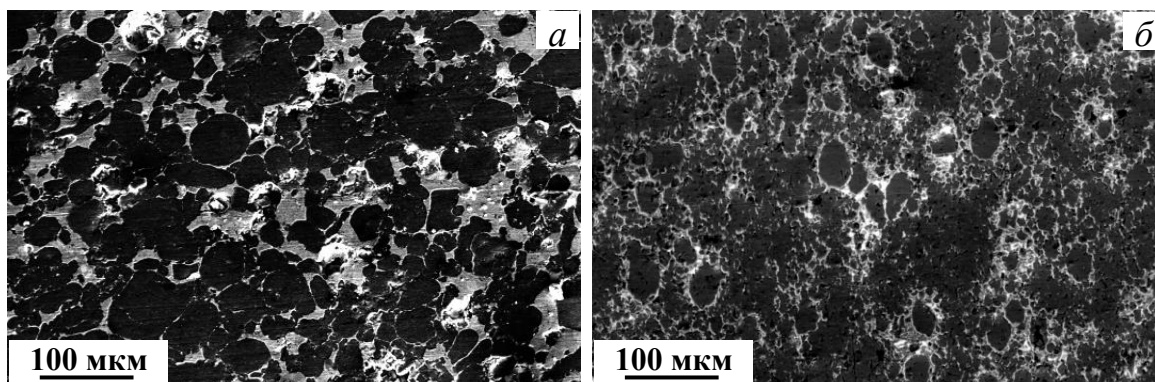


Рисунок 3.3. – Структура спеченных (600°C; 20 минут) композитов (Al-0,5Si)-40Sn (а) и Al-40Sn (б)

Механические свойства спеченных композитов оценивали путем испытания их на сжатие. Обнаружено, что образцы с малой пористостью и со связанным алюминиевым каркасом обладают наибольшей прочностью и пластичностью. При нагружении композитов со слабосвязанной матрицей, зерна которой разделены прослойками мягкой фазы, пластическое течение имеет тенденцию к локализации в таких прослойках. Ресурс их пластичности быстро исчерпывается, и при осадке образцов более чем на 4 % напряжение течения таких материалов начинает снижаться (рисунок 3.4).

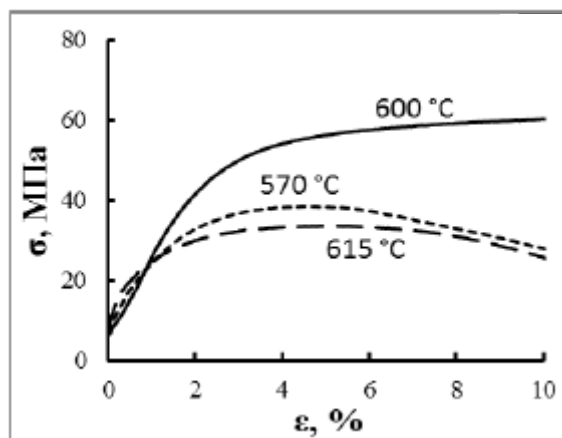


Рисунок 3.4 – Кривые сжатия спеченных (1 час) композитов (Al-0,5Si)-40Sn

Триботехнические испытания спеченных композитов на сухое трение проводили по схеме «палец-диск». Из анализа приведённых в таблице 3.2 данных следует, что повышение связанности зёрен матрицы и снижение пористости композитов (Al-0,5Si)-40Sn значительно улучшают их сопротивление изнашиванию при отсутствии жидкой смазки. Поэтому



интенсивность изнашивания спечённых композитов падает с увеличением температуры их спекания до 600 °С, а затем опять возрастает у образцов, спечённых при 615 °С, из-за их повышенной остаточной пористости и низкой связанности алюминиевого каркаса. То есть, поры как концентраторы критических напряжений снижают пластичность приповерхностных слоёв образцов и, следовательно, способствуют увеличению их износа при трении. Особенно сильно данный эффект проявляется при высоких нагрузках, когда деформационная составляющая износа образцов возрастает.

Таблица 3.2 – Результаты триботехнических испытаний при сухом трении по стали спеченных образцов (Al-0,5Si)-40Sn. Скорость скольжения – 0,6 м/с, контурная площадь трения образца – 9 мм<sup>2</sup>

Состав композитов	Режим спекания	Пористость, %	Интенсивность изнашивания, мкм/м		
			1 МПа	3 МПа	5 МПа
(Al-0,5Si)-40Sn	570 °С; 1 час	11,6	0,31	0,75	треснул
	600 °С; 1 час	4,5	0,18	0,22	0,33
	615 °С; 1 час	10,4	0,21	0,43	треснул
Al-40Sn	600 °С; 1 час	0,8	0,10	0,18	0,24

В случае спекания композитов на основе порошка силумина эвтектического состава (Al-12Si)-40Sn нагрев их до температур, при которых обеспечивается хорошее смачивание твердых частиц жидким оловом, приводит к образованию большого количества эвтектической жидкости в дополнение к расплавленному олову. В результате спекаемые образцы теряют форму под действием собственного веса и происходит выпотевание большого количества жидкости. Поэтому в работе спекание прессовок проводили при температурах ниже эвтектической (577 °С), когда угол смачивания алюминиевых частиц жидким оловом достаточно большой.

Ввиду толстой оксидной плёнки на порошках сплава Al-12Si, спеканию их в смеси с оловом также должна предшествовать предварительная выдержка, обеспечивающая установление контактов жидкого олова непосредственно с

чистой поверхностью Al частиц. Было установлено, что для разрушения оксидной плёнки на порошках и инициации их активного взаимодействия с расплавом необходима предварительная выдержка прессовок в присутствии жидкого олова при температуре 550 °С не менее 1 часа [47].

За это время происходит разрушение оксидной плёнки на олове, проникновение жидкости под оксидные плёнки и её растекание по поверхности Al частиц. Однако при этом угол смачивания алюминия оловом достаточно большой, поэтому обширные участки поверхности алюминиевых порошинок остаются не смоченными. В результате алюминиевый каркас был слабым, а пористость прессовок близка к исходной (Таблица 3.3). Полученные образцы быстро разрушались при механическом испытании на сжатие, а также в процессе трения по стали, даже при малых нагрузках [48].

С целью уменьшения угла смачивания и улучшения связанности матричного каркаса, температура спекания брикетов была повышена до 570 °С. Из приведенных в таблице 3 данных видно, что в результате роста температуры спечённых композитов снизилась на 2-3 % и далее практически не менялась с увеличением длительности спекания. Вместе с тем, с увеличением температуры и времени спекания растёт количество выпотевшего из образца олова.

Механические испытания на сжатие показали, что вид кривых течения образцов (Al-12Si)-40Sn с различным временем спекания существенно отличается (рисунок 3.5). Видно, что увеличение времени выдержки способствует заметному улучшению их пластичности, а при значительном его увеличении еще и росту прочности спекаемого материала. Объяснение такому влиянию длительности выдержки при 570 °С на механические свойства образцов с одинаковым составом и равной пористостью следует искать в особенностях формирующейся структуры.

Таблица 3.3 – Характеристики структуры и механические свойства спеченных композитов (Al-12Si)-40Sn

Режим спекания	Пористость, %	Относительная потеря массы, %	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
550 °С; 1 час	9,7	3,4	треснул	
550 °С; 1 час + 570 °С; 10 мин	6,5	6,8	60	3,8
550 °С; 1 час + 570 °С; 30 мин	6,7	7,9	57	6
550 °С; 1 час + 570 °С; 120 мин	6,2	9,9	80	11

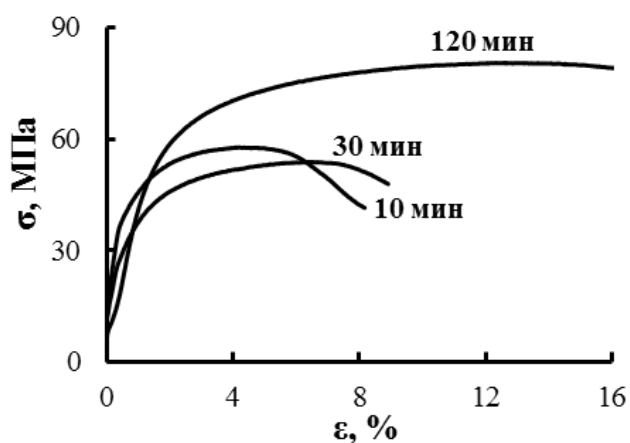


Рисунок 3.5 – Кривые сжатия образцов спечённого композита (Al-12Si)-40Sn.

Цифры у кривых указывают время (мин) выдержки прессовок при 570 °С

Металлографические исследования структуры композитов (Al-12Si)-40Sn показали, что после кратковременной выдержки их при указанной температуре размер шеек спекания между контактирующими твёрдыми частицами мал, а сами шейки малочисленны (рисунок 6а). После 2-часовой выдержки прессовок при 570 °С шейки стали более многочисленными, а их размер значительно вырос (рисунок 6б). Несомненно, такое укрепление контактов между частицами алюминиевого сплава приводит к повышению сопротивления образуемого ими матричного каркаса локализации

пластического течения. Однако абсолютные значения максимальной прочности  $\sigma_B$  композита (Al-12Si)-40Sn после 2-часовой выдержки при 570 °С оказались всего лишь на 1 МПа выше, чем прочность сжатого до той же величины  $\varepsilon$  и не содержащего кремний образца Al-40Sn, также спечённого при 600 °С и выдержке 1 час. Очевидно, что такая незначительная разность в прочности двух спечённых композитов с нелегированной и легированной матрицей обусловлена более высокой (~6 %) пористостью последнего и большой дефектностью межфазных границ [47].

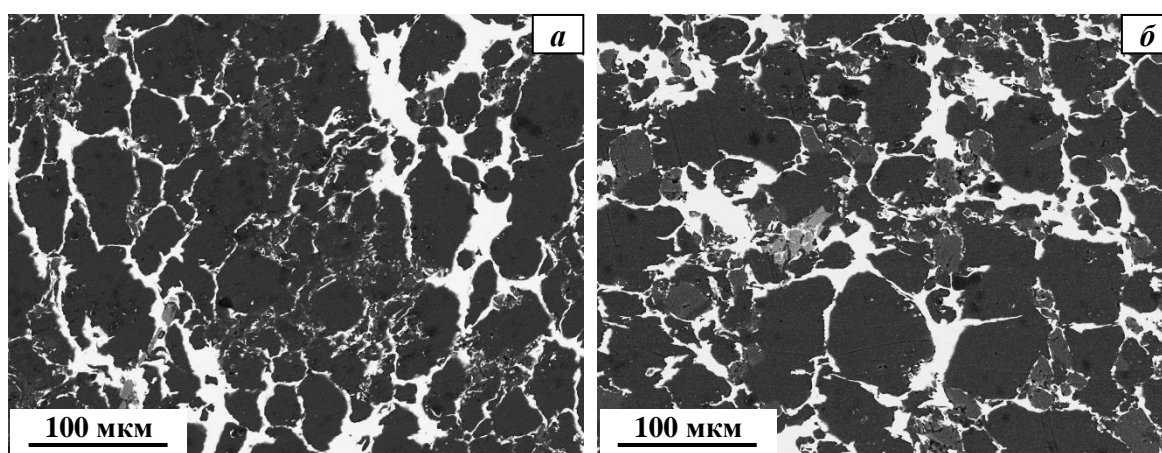


Рисунок 3.6 – Структура композита (Al-12Si)-40Sn. Температура спекания 570 °С, время выдержки 10 (а) и 120 (б) минут

Триботехнические испытания полученных композитов (Al-12Si)-40Sn показали, что повышение прочности матричного каркаса приводит к росту их износостойкости при сухом трении по стали. Из приведенных в таблице 3.4 данных видно, что с увеличением длительности спекания интенсивность изнашивания исследуемого композита снижается, особенно заметно при высоких давлениях. При этом износостойкость полученного композита (Al-12Si)-40Sn с большим количеством твердых частиц была хуже по сравнению с двухфазным материалом Al-40Sn. Причиной данного отличия является наличие у легированного кремнием образца большого количества пор, которые являются источниками возникновения трещин при воздействии неровностей контртела на поверхность материала в процессе трения.

Таблица 3.4 – Результаты триботехнических испытаний при сухом трении по стали спеченных образцов (Al-12Si)-40Sn. Скорость скольжения – 0,6 м/с, площадь поверхности образца – 9 мм<sup>2</sup>

Режим спекания	Интенсивность изнашивания I <sub>h</sub> , мкм/м			
	1 МПа	3 МПа	4 МПа	5 МПа
(550 °C; 1ч + 570 °C; 10 мин)	0,26	0,43	0,64	разрушился
(550 °C; 1ч + 570 °C; 120 мин)	0,10	0,20	0,24	0,26
Al-40Sn (600 °C; 60 мин)	0,10	0,18	-	0,24

В случае спекание брикетов из алюминиевого сплава заэвтектического состава (Al-23Si)-40Sn также применялась предварительная выдержка при 550 °C в течение одного часа для того, чтобы дать возможность олову растечься по прессовке без значительного его выпотевания из образца. Не смотря на тот факт, что, согласно диаграмме состояния, брикеты данного состава можно нагревать до температуры 600 °C и выше, спекание при температурах выше эвтектической приводит к значительному выпотеванию олова и потере формы образцов. Сильное выпотевание, вероятно, связано с плохим смачиванием жидким Sn порошинок алюминиевого сплава, поверхность которых была сильно окислена, не смотря на предварительную активацию в шаровой мельнице.

Из приведенных в таблице 3.5 данных видно, что в процессе спекания при температуре 550 °C конечная пористость прессовок стала 12,4 % при исходной около 10 %. То есть, наблюдался объемный рост порошковых брикетов (Al-23Si)-40Sn. Дальнейшее увеличение температуры спекания до 570°C привело к заметному уплотнению образцов ввиду уменьшения угла смачивания частиц алюминиевого сплава и их перегруппировки под действием возросших капиллярных сил.

Таблица 3.5 – Влияние режима спекания на характеристики структуры и прочность композитов (Al-23Si)-40Sn

Режим спекания	Пористость, %	Напряжение течения ( $\sigma_4$ ), МПа	Деформация до разрушения $\delta$ , %
550°C 1 час	12,4	треснул	
550°C; 1ч+570°C; 10 мин	8,4	36	1,7
550°C; 1ч+570°C; 60 мин	7,8	61	3,5

Из приведенных на рис. 6 фотографий макроструктуры видно, что с увеличением длительности спекания структура композита огрубляется, размер оловянных включений увеличивается, а алюминиевый каркас становится более связанным. В результате, не смотря на то, что пористость материала при этом меняется незначительно (Таблица 3.5), прочность и пластичность его при механическом испытании на сжатие увеличиваются практически в 2 раза (рисунок 3.7). Однако механические свойства данного композита заметно уступают аналогичным характеристикам описанных выше спеченных материалов (Al-Si)-40Sn, со значительно меньшим содержанием кремния.

Кремний в олове не растворяется, поэтому он присутствует в спеченных образцах сразу в виде мелких частиц. Как показали результаты проведенного с помощью РЭМ микроанализа, частицы кремния во всех спеченных композитах (Al-Si)-40Sn в основном располагались на границе олова с алюминием. При этом адгезионная связь их с оловянными и алюминиевыми фазами была слабая ввиду наличия на поверхности частиц кремния оксидных пленок. При нагружении материала такие места являются источниками возникновения трещин. Поэтому такие композиты обладают низкой пластичностью и, как показали триботехнические испытания, в процессе сухого трения разрушаются при давлении более 3 МПа.

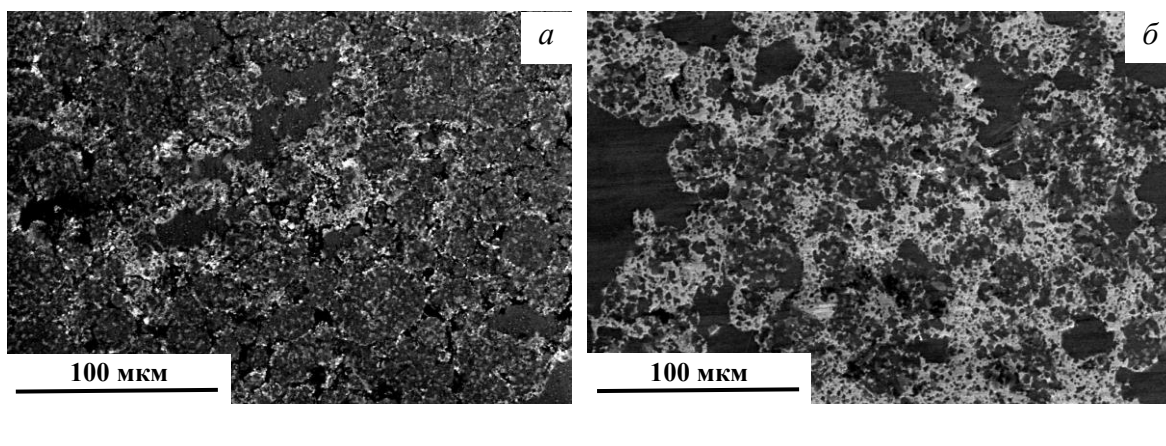


Рисунок 3.7 – Структура композита (Al-23Si)-40Sn. Температура спекания 570 °С, время выдержки 10 (а) и 60 (б) минут

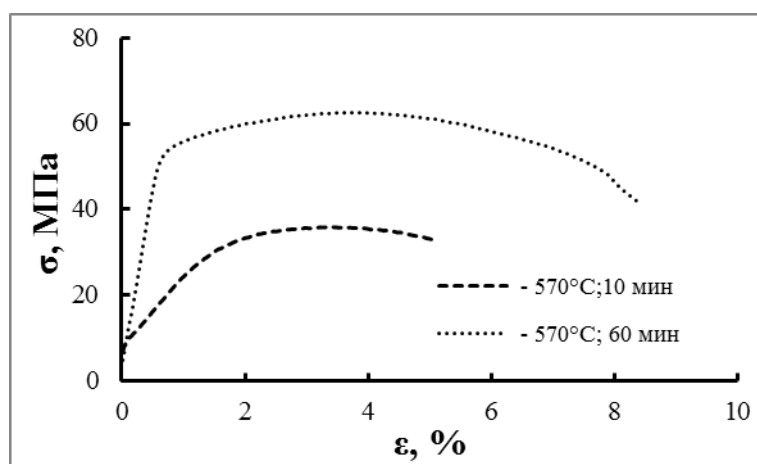


Рисунок 3.8 – Кривые сжатия образцов спекённого композита (Al-23Si)-40Sn

Таким образом, метод жидкофазного спекания позволяет получать композиты (Al-Si)-40Sn с различным содержанием кремния, обладающие достаточно прочным алюминиевым каркасом. Однако их механические характеристики и износостойкость при сухом трении по стали не превышали аналогичные значения, полученные в результате спекания двухфазного материала Al-40Sn. Причиной этому является наличие в исследуемых образцах (Al-Si)-40Sn остаточной пористости и дефектов на межфазных границах.

Поэтому следующей целью настоящей работы было получение высокоплотных композитов (Al-Si)-40Sn с равномерным распределением структурных элементов.

### **3.2. Влияние деформационной обработки на структуру, механические и трибологические свойства спеченных композитов (Al-Si)-40Sn**

В предыдущем разделе было показано, что избавиться от достаточно высокой остаточной пористости в композитах «алюминиевый сплав – 40 % олова» спеканием за разумное время выдержки не представляется возможным. В результате, их износостойкость при сухом трении уступала износостойкости плотного (менее 1 % пор) спечённого прототипа Al-40Sn, несмотря на его менее прочную и твёрдую матрицу.

Понизить пористость спеченных образцов за счёт их высокой плотности в сыром состоянии оказалось очень сложно, так как из-за высокой твёрдости порошков алюминиевого сплава для этого необходимо приложить значительное давление прессования, при котором мягкая фаза начинает выдавливаться в зазоры между пуансоном и матрицей пресс-формы и приводить к заеданию прессового инструмента.

Одним из способов получения высокоплотных композитов является последующая деформационная обработка спеченных образцов. В случае двухфазных композитов Al-Sn высокую эффективность показала обработка методом равноканального углового прессования (РКУП), позволившая значительно увеличить механические свойства и износостойкость спеченных материалов как за счет их упрочнения, так и изменения формы структурных элементов [49]. РКУП осуществляли в пресс-форме с перпендикулярными каналами равного сечения, где образец испытывал большую деформацию за одно прессование ( $\epsilon \approx 1,15$ ). В случае нелегированной алюминиевой матрицы материал обладает высокой пластичностью и был способен выдерживать значительные деформации (до 4-х проходов) без разрушения образца.

В нашем же случае, образцы с легированной кремнием матрицей содержали большое количество твердых частиц Si, а также много дефектных мест на межфазных границах. То есть, композиты (Al-Si)-40Sn, особенно с



высоким содержанием кремния, обладали значительно меньшей пластичностью по сравнению с двухфазным материалом. В результате только образец (Al-0,5Si)-40Sn смог выдержать однократное прессование методом РКУП, в то время как композиты (Al-12Si)-40Sn и (Al-23Si)-40Sn разрушались.

Оказалось, что проблему получения высокоплотных композитов «алюминиевый сплав – 40 % олова» можно решить путем горячего доуплотнения (ГД) спечённых образцов в закрытой пресс-форме. В этом случае при прессовании можно использовать жидкие смазки, с помощью которых уплотнить спечённые образцы оказалось гораздо легче, чем сырые смеси без смазки. К тому же, олово в процессе спекания растеклось по прессовке, и его прослойки между твёрдыми алюминиевыми частицами выступали в роли смазочных плёнок. Также не маловажно, что стало возможным нагревать образцы до высоких температур без значительного окисления материала ввиду закупорки многих поровых каналов оловом. При этом деформация, которую испытывают образцы при ГД, значительно меньше, по сравнению с РКУП. Горячее доуплотнение спеченных композитов осуществляли при температуре 200 °С, которая, как показали предыдущие исследования [2], является оптимальной для деформационной обработки сплавов Al-Sn. Для сравнения, спеченные двухфазные композиты Al-40Sn также были подвергнуты горячему доуплотнению при данной температуре.

В ходе проведённых исследований было установлено (таблица 3.6), что такая обработка приводит практически к полному исчезновению пор и щелей на межфазных границах Al-Sn. В результате пористость всех исследуемых образцов не превышала 0,1 %. На рисунке 3.9 видно, что после ГД макроструктура спечённых композитов стала более однородной, оловянные прослойки обжалась и стали заметно тоньше. И если в случае обработки крупнозернистого композита Al-40Sn они заметно сплюснулись, то в более мелкозернистых образцах (Al-Si)-40Sn помимо этого наблюдается ещё и измельчение оловянных включений за счет сдвига мелких алюминиевых частиц относительно друг друга в направлении прессования.

Таблица 3.6 – Значения пористости и механические свойства спеченных и подвергнутых деформационной обработке композитов (Al-Si)-40Sn

Композит	Режим получения	Пористость, %	Напряжение течения $\sigma_{-4}$ , МПа
Al-40Sn	(600 °C; 60 мин)	0,8	62
	(600 °C; 60 мин) + ГД 200 °C	$\leq 0,1$	80
	(600 °C; 60 мин) + 1 РКУП (200 °C)	$\leq 0,1$	108
(Al-0,5Si)-40Sn	(600 °C; 60 мин)	4,5	56
	(600 °C; 60 мин) + ГД 200 °C	$\leq 0,1$	107
	(600 °C; 60 мин) + 1 РКУП (200 °C)	$\leq 0,1$	129
(Al-12Si)-40Sn	(570 °C; 10 мин)*	6,5	62
	(570 °C; 120 мин)*	6,2	80
	(570 °C; 10 мин)* + ГД 200 °C	$\leq 0,1$	126
(Al-23Si)-40Sn	(570 °C; 60 мин)*	7,8	61
	(570 °C; 60 мин)* + ГД 200 °C	0,1	158

\*Предварительная выдержка 1 час при 550 °C

Из таблицы 3.6 и приведенных на рисунке 3.10 кривых сжатия видно, что в результате указанных изменений прочность спеченных композитов после ГД значительно повысилась и тем заметнее, чем больше в исходном образце было пор и кремния. При этом пластичность композитов, за исключением образца состава (Al-23Si)-40Sn, осталась на том же высоком уровне (более 16 %).

Таким образом, все исследуемые композиты (Al-Si)-40Sn после обработки обладали более высокой прочностью по сравнению с двухфазным материалом Al-40Sn, также подвергнутым горячему доуплотнению и, следовательно, практически не содержащим пор. Например, напряжение течения горячеуплотненного композита Al-40Sn при сжатии его на 4 % ( $\sigma_{-4}$ ) составляло 80 МПа, а образца (Al-0,5Si)-40Sn после ГД – 107 МПа. Прочность композитов (Al-12Si)-40Sn и (Al-23Si)-40Sn была ещё выше – 126 и 158 МПа, соответственно.

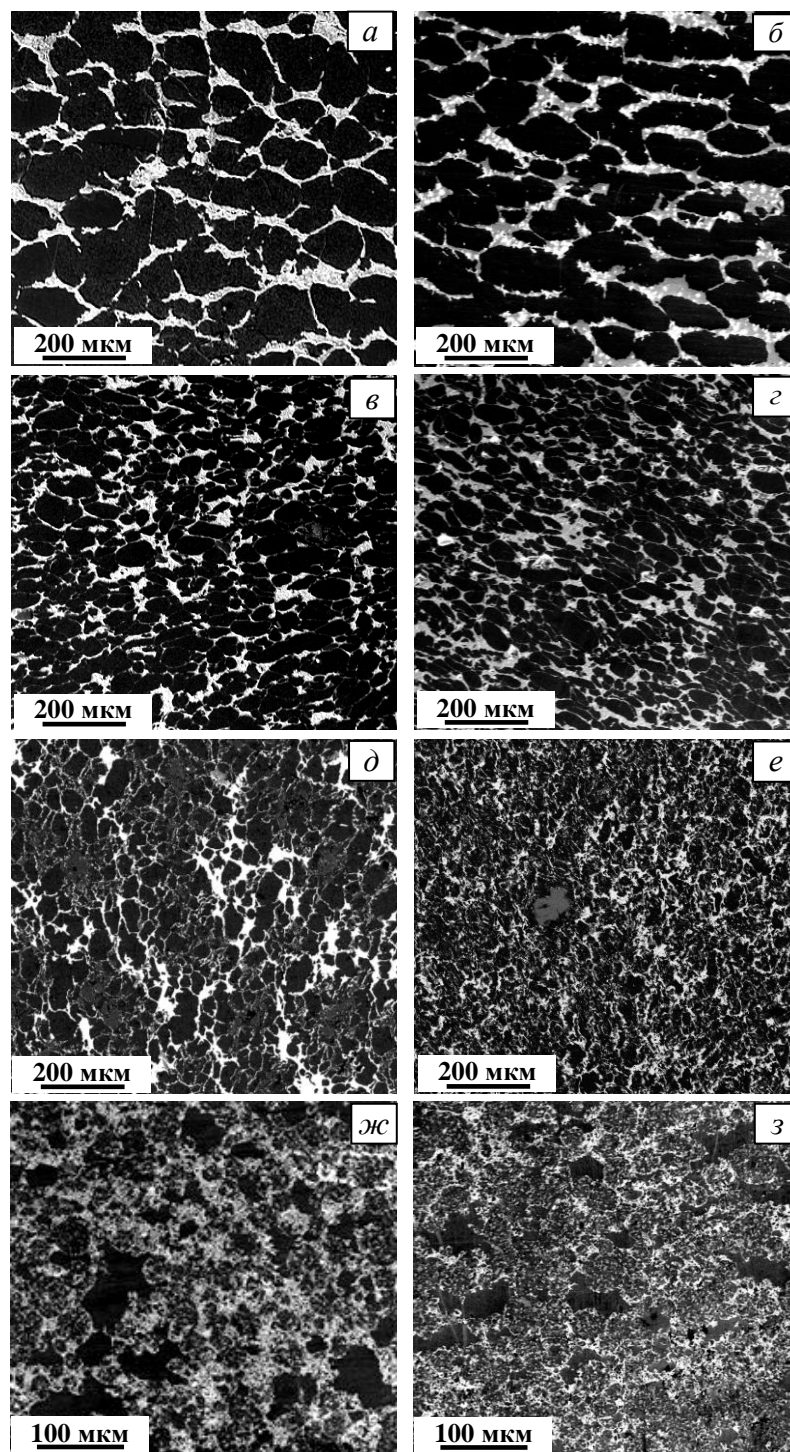


Рисунок 3.9 – Структура композитов Al-40Sn (*a, б*), (Al-0,5Si)-40Sn (*в, г*), (Al-12Si)-40Sn (*д,е*) и (Al-23Si)-40Sn (*ж, з*) после спекания (слева) и доуплотнения при 200 °С (справа), соответственно. Режим спекания: *a-г* – (600 °С; 1 час); *д, е* – (550 °С; 1 час + 570 °С; 10 мин); *ж, з* – (550 °С; 1 час + 570 °С; 60 мин)

Отметим, что прочность  $\sigma_B$  отлитого в кокиль сплава Al2 [50], содержащего до 12 % кремния, составляет около 150 МПа, а относительное удлинение  $\delta \approx 4$  %. Таким образом, исследуемый спеченный композит (Al-12Si)-40Sn показал хороший результат (126 МПа), если учесть ещё, что он содержит 40 % мягкого олова, не упрочняющегося при комнатной температуре.

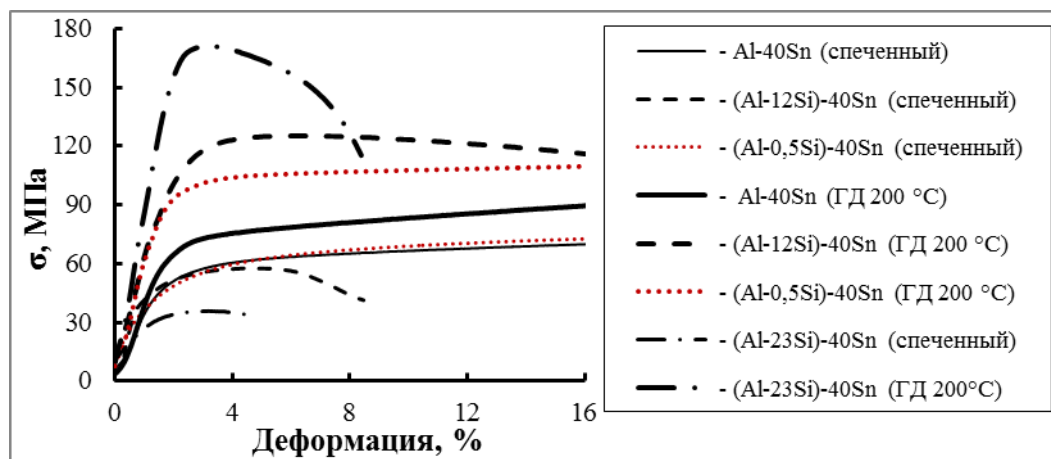


Рисунок 3.10 – Кривые сжатия композитов (Al-Si)-40Sn после спекания и последующего их горячего доуплотнения при 200 °С

Устранение пор и слабых межчастичных контактов за счет перемещения образующих каркас твердых порошинок алюминиевого сплава привело к тому, что при испытании материалов на сжатие зерна матрицы упираются друг в друга и начинают плющиться. Испытанная ими деформация приводит к упрочнению зерен за счет накопления в них решёточных дислокаций и повышению напряжения течения матрицы композитов. В пористых же композитах такое повышение напряжения течения ограничивалось из-за того, что поры и слабые межфазные границы начинали работать как дислокационные стоки уже при низких нагрузках на образец. Пластическое течение сосредотачивалось в полосах сдвига, содержащих большую концентрацию таких дефектов, вызывало растрескивание материала и разрушение образцов.

В случае образцов (Al-23Si)-40Sn пластичность их после ГД практически не меняется и составляет примерно 4 %. Дело в том, что частицы кремния при больших деформациях начинают разрушаться из-за того, что имеют неравновесную форму, и на их поверхности возникают концентраторы

напряжений. Возникающие при растрескивании частиц Si трещины распространяются в зерна матрицы и вызывают их ослабление. В результате, напряжение течения композитов с большим содержанием кремния в матрице начинает снижаться, и по мере разрастания трещин в материале положительный наклон кривой течения КМ сменяется на отрицательный.

Поскольку алюминиевые сплавы склонны также и к деформационному упрочнению, то для повышения прочностных свойств можно подвергнуть их обработке методами интенсивной пластической деформации. Как было отмечено выше, в качестве такого способа был выбран метод РКУП. В результате такой обработки композиты с содержанием кремния 12 % и выше разрушались, ввиду недостаточной пластичности. В случае образца (Al-0,5Si)-40Sn удалось осуществить однократное его деформирование. На рисунке 3.11 показана полученная его структура в плоскости течения материала. Видно, что в результате РКУ обработки частицы алюминиевой матрицы, а также оловянные включения вытянулись и утонились.

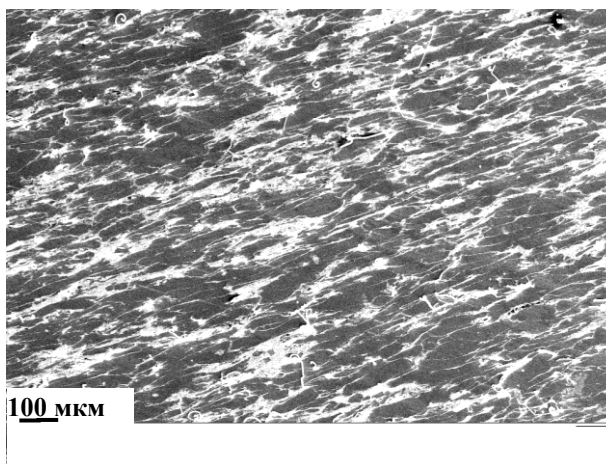


Рисунок 3.11 – Структура спеченного (600 °С; 1 ч) композита (Al-0,5Si) после одного РКУП (200 °С). Плоскость рисунка – плоскость течения материала

Из кривых сжатия на рисунке 3.12 видно, что в результате указанных структурных изменений обработка методом РКУП приводит к еще большему упрочнению композита (Al-0,5Si)-40Sn, по сравнению с деформированием методом горячего доуплотнения. Заметим, однако, что упрочнение композита

после РКУП сопровождается существенным снижением пластичности до 6-8 %, в результате чего его нельзя было подвергать повторным прессованиям с целью дополнительного упрочнения.

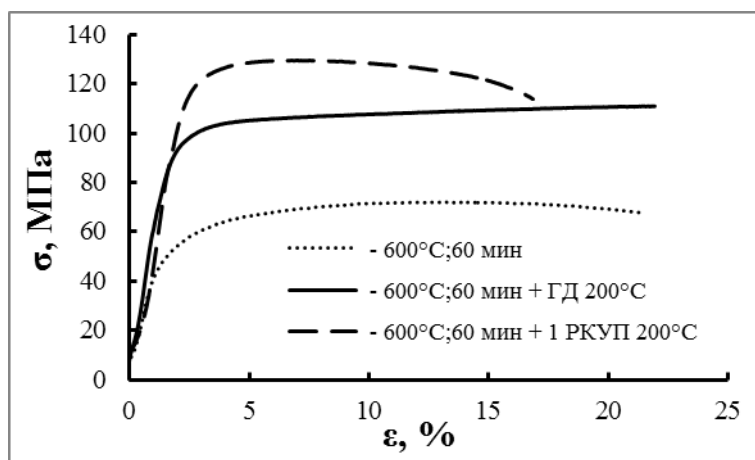


Рисунок 3.12 – Кривые сжатия образцов композита (Al-0,5Si)-40Sn после спекания и последующей деформационной обработки

В ходе проведенных испытаний было установлено, что устранение из спечённых композитов концентраторов напряжений типа пор и несплошностей на границах зёрен матрицы привело не только к повышению их прочности и пластичности, но и к улучшению износостойкости КМ в условиях сухого трения по стали. Особенно заметен эффект деформационной обработки при большом содержании в композитах кремния и высоком давлении на поверхность трения. Так, уплотнение образца Al-40Sn с чистой алюминиевой матрицей привело лишь к 10 % улучшению его износостойкости, и то только при высоком давлении 5 МПа (таблица 3.7). Тогда как износостойкость композита (Al-12Si)-40Sn после той же обработки с устранением пор возрастает в 3 раза, и почти на 20 % превышает износостойкость доуплотнённого композита с чистой Al матрицей.

Из приведённых в таблице 3.7 данных также видно, что интенсивность изнашивания ( $I_h$ ) композита (Al-0,5Si)-40Sn после его горячего доуплотнения снизилась при давлении 5 МПа приблизительно на 30 %. После РКУП обработки износостойкость такого композита становится выше по сравнению с

доуплотненным образцом, но только при давлении 5 МПа. Видимо, этот факт, связан с тем, что с ростом давления возрастает деформационная составляющая износа образцов, а рост прочности композитов способствует ее снижению.

Таблица 3.7 – Результаты триботехнических испытаний при сухом трении по стали спеченных и подвергнутых деформационной обработке композитов (Al-Si)-40Sn. Скорость скольжения – 0,6 м/с, площадь поверхности образца – 4 мм<sup>2</sup>

Композит	Режим получения	Интенсивность изнашивания I <sub>h</sub> , мкм/м		
		1 МПа	3 МПа	5 МПа
Al-40Sn	(600 °С; 1 ч)	0,13	0,20	0,29
	(600 °С; 1 ч) + ГД 200 °С	0,13	0,20	0,26
(Al-0,5Si)-40Sn	(600 °С; 1 ч)	0,18	0,23	0,35
	(600 °С; 1 ч) + ГД 200 °С	0,13	0,18	0,25
	(600 °С; 60 мин) + 1 РКУП (200 °С)	0,13	0,18	0,23
(Al-12Si)-40Sn	(570 °С; 10 мин)*	0,27	0,50	0,77
	(570 °С; 10 мин)* + ГД 200 °С	0,12	0,18	0,21
(Al-23Si)-40Sn	(570 °С; 60 мин)*	0,14	0,41	треснул
	(570 °С; 60 мин)* + ГД 200 °С	0,14	0,25	0,39

\*Предварительная выдержка 1 час при 550 °С

Таким образом, уплотнение композитов с легированной кремнием матрицей и измельчение их структуры сделало сопротивление данных материалов истиранию при сухом трении более эффективным, чем у исходного прототипа Al-40Sn. При этом видно, что вклад кремниевых частиц в износостойкость композитов большой. Так, напряжение течения при деформации на 4 % КМ с матрицей (Al-12Si) после горячего доуплотнения было выше, чем в случае образца с матрицей (Al-0,5Si), как, соответственно, и износостойкость при сухом трении. То есть, устранение пор и других слабых мест повышает механические свойства композита и прочность закрепления твёрдых частиц кремния в матрице. В свою очередь, твёрдые частицы не позволяют поверхностным неровностям контртела проникать глубоко в алюминиевую матрицу и толщина деформируемого слоя снижается. Чем больше концентрация таких частиц, тем тоньше деформируемый слой. Это хорошо видно из сравнения фотографий на рисунке 3.13 Поверхность трения у

образца с 12 % кремния гладкая даже при высоком давлении, тогда как поверхность малолегированного образца содержит множество канавок оттеснённого материала.

В свою очередь, композит (Al-23Si)-40Sn, не смотря на значительное количество твердых частиц, обладал низкой пластичностью. В результате при низком давлении 1 МПа он показывал хорошее сопротивление изнашиванию при сухом трении, тогда как при высоких давлениях под воздействием неровностей контртела пластичность поверхностного слоя композита быстро исчерпывалась, и износ образца значительно увеличивался. Горячее доуплотнение спеченного образца (Al-23Si)-40Sn способствовало значительному увеличению его износостойкости, однако значение  $I_h$  было заметно больше по сравнению с композитами (Al-Si)-40Sn, содержащими значительно меньшее количество частиц кремния.

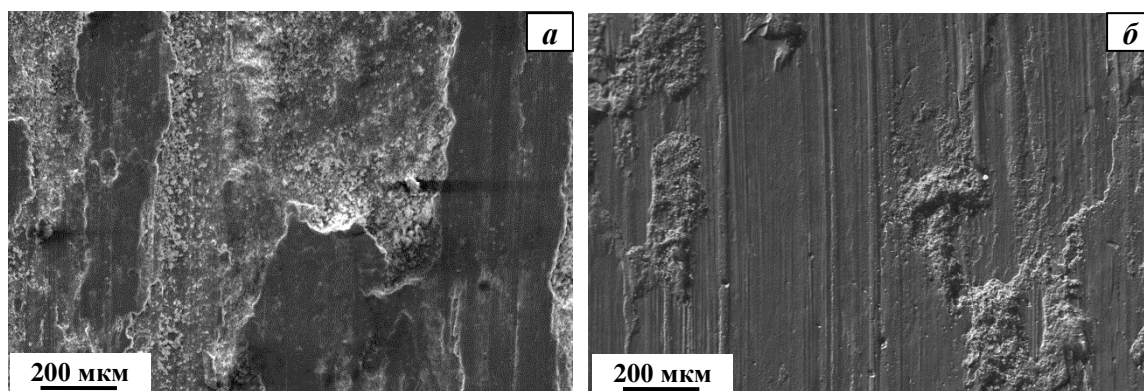


Рисунок 3.13 – Поверхность трения спеченных и подвергнутых горячей допрессовке композитов (Al-12Si)-40Sn (а) и (Al-0,5Si)-40Sn (б). Давление – 5 МПа. Скорость скольжения – 0,6 м/с



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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4АМ61	Караваев Владимир Евгеньевич

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение</b>	материаловедения
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	машиностроение

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

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></li> <li>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></li> <li>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></li> </ol>	<i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах</i>
--	--

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

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i></li> <li>2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i></li> <li>3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Потенциальные потребители результатов исследования;</i></li> <li>2. <i>Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;</i></li> <li>3. <i>SWOT-анализ;</i></li> <li>4. <i>Инициация проекта.</i></li> </ol> <p><i>Оценка сравнительной эффективности исследования. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта</i></p>
--	---

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Старикова Е.В.	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Караваев В.Е.		

## **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **4.1. Предпроектный анализ. Потенциальные потребители результатов исследования**

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта по получению спеченных композитов системы (Al-Si)-Sn.

Для достижения цели в данном разделе выпускной квалификационной работы представлены результаты расчётов бюджета научного исследования, оценочная карта сравнения конкурентных технических решений, оценка сравнительной эффективности исследования, рассмотрены различные варианты рисков связанных с реализацией продукции на потребительском рынке.

Потенциальным потребителем результатов исследования может являться любое машиностроительное предприятие. В особенности производители подшипников скольжения. Поскольку подшипники используются практически в любой отрасли, где используются машины, то любому машиностроительному предприятию производителю данные результаты исследования будут представлять интерес.

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

#### **4.1.1. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Проблема снижения интенсивности износа ответственных деталей в узлах трения является актуальной, а для ее решения требуется создание новых

антифрикционных материалов с улучшенными механическими и трибологическими свойствами или модернизация существующих. Так, сплавы на основе системы Al-Sn отвечают всем необходимым требованиям, предъявляемым таким материалам. С увеличением содержания мягкого олова, выполняющего функцию твердой смазки, возрастает их износостойкость и давление схватывания со стальным контртелом.

Однако, при получении таких сплавов литьем содержание олова в них ограничено 20 вес.% по причине дезинтеграции алюминиевого каркаса оловянными прослойками при кристаллизации расплава и, как следствие, значительного снижения несущей способности и пластичности сплавов. Оказалось, что решить данную проблему можно, например, с помощью методов порошковой металлургии. Причём в этом случае предельная концентрация олова в спеченных композитах Al-Sn, при которой алюминиевый каркас остается ещё связанным, достигает 50 вес.%. К сожалению, несущая способность таких спеченных материалов резко снижается с ростом концентрации олова выше 30%. Повысить несущую способность композитов можно за счёт повышения связанности матричного каркаса, либо при той же связанности путем его легирования. Поскольку алюминий и олово в твердой фазе взаимно нерастворимы, то для указанной цели лучше всего использовать порошки готового алюминиевого сплава, легированного заданным количеством компонентов. В настоящей работе в качестве такого компонента был выбран кремний, поскольку известно, что он повышает износостойкость алюминиевых сплавов, а также не растворяется в олове и, тем самым, не будет ухудшать его смазочные свойства.

**Целевой рынок** – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

**Сегментирование** – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка

		Потенциальные отрасли использования антифрикционных композиционных материалов системы (Al-Si)-Sn		
		Авиастроение	машиностроение	Космическое машиностроение
Характерист	Высокий КПД (малые потери)		x	
	Материалоёмкость (компактность)	x	x	x
	Надёжность, долговечность		x	
	Цена	x	x	x

Как видно из карты сегментирования, основным сегментом данного рынка является машиностроение, где требуются высокая износостойкость и малые потери. Однако помимо машиностроения характеристиками данного антифрикционного материала могут пользоваться и другие машиностроительные отрасли.

Проведем конкурентную оценку получения спеченных композиционных материалов системы (Al-Si)-Sn Кф и получение таких сплавов методом литья Кк.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок).

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк	Кф	Кк
1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1.Повышение производительности труда пользователя	0,2	4	3	0,8	0,6
2.Простота технологии получения сплава	0,1	3	2	0,3	0,2
3.Энергоэкономичность	0,2	5	3	0,8	0,6
4. Надёжность	0,05	4	4	0,20	0,20
5. Уровень шума	0,05	3	3	0,15	0,15
6.Экологичность материала	0,10	4	3	0,4	0,3

7. Область применения композиционного материала	0,10	3	2	0,3	0,2
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	2	0,4	0,2
2. Цена	0,05	3	3	0,4	0,45
3. Финансирование научной разработки	0,05	4	2	0,2	0,1
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>37</b>	<b>27</b>	<b>3,95</b>	<b>3,0</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Получение сплавов системы (Al-Si)-Sn методом порошковой металлургии позволяет получить увеличение производительности при значительно более низких затратах по сравнению с методом получения таких сплавов методом литья, имея значительное преимущество по следующим параметрам:

- простотой получения;
- энергозатраты на производство партии продукта;
- себестоимостью готового продукта;
- экологичностью для окружающей среды.

## 4.2 SWOT-анализ

Одним из эффективных средств снижения интенсивности износа ответственных деталей в узлах трения – это создание новых антифрикционных материалов с улучшенными механическими и трибологическими свойствами или модернизация существующих. Износостойкие материалы позволяют получить рабочие поверхности тел в узлах трения с необходимыми служебными характеристиками.

Основные преимущества данного проекта - универсальность, высокая производительность и возможность создания оптимальных условий формирования износостойких композиционных материалов с заданными служебными характеристиками, увеличение срока службы узлов трения, эффективное использование оборудования, снижение себестоимости изделия.

Но не смотря на все преимущества проекта, есть и слабые стороны. На данном этапе не усовершенствована технология спекания используемых порошков, а также технология последующей интенсивной пластической деформации, поэтому возникают некоторые трудности при получении композиционного материала.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно исследовательского проекта:</b>
	С1. Возможность модифицирования состава исходного материала; С2. Высокая работоспособность изделия; С3. Улучшение антифрикционных свойств поверхности; С4. Снижение себестоимости изделия;	Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки; Сл2. Не отработана технология получения порошков, которые в дальнейшем используются для формирования образцов; Сл3. Вероятность структурообразования составов; Сл4. Вероятность получения брака;

<p><b>Возможности:</b></p> <p>V1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ (т.е. использование научного оборудования);</p> <p>V2. Возможность внедрения технологии в производство;</p> <p>V3. Возможность участия в грантах, для повышения производительности изделия;</p> <p>V4. Появление дополнительного спроса на новый продукт;</p>	<p>C1 V2. Внедрение технологии в различные производства за счет возможности варьирования состава;</p> <p>C4 V2. Вероятность расширения количества поставщиков (снижение себестоимости изделия);</p> <p>C2 V3. участие в грантах приводят к улучшению высокой работоспособности изделия;</p>	<p>V1 Сл4. новейшее оборудование, позволит на ранних стадиях исследование, выявить и предотвратить появление брака;</p> <p>V1 Сл1. Возможность изготовления прототипа;</p> <p>V3 Сл2. Возможность отработки технологии на средства из грантов;</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. Вероятность появления более высокооплачиваемой предложений на рынке, так как в данном направлении ведется большое количество исследований.</p> <p>У2. Отсутствие оборудования для массового производства;</p> <p>У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства приводит к несвоевременно выполнению заказов изделия;</p>	<p>У1 С1. Возможность изменить состав для повышения конкурентоспособности с новыми предложениями на рынке.</p> <p>У3 С4. Появление резервных средств за счет экономии материала.</p>	<p>У3 Сл4. длительный простой производства.</p> <p>У2 Сл1. Нежелание крупных предприятий сотрудничать в условиях отсутствия прототипа и оборудования массового производства.</p>

Из вышеприведенных примеров мы можем прийти к выводу, что исследуемый научный проект имеет множество сильных сторон, которые считаются наиважнейшим для его выполнения. На данном этапе старт продукции на рынке сложно предугадать. Велика вероятность слабого старта продукции на потребительском рынке из-за низкого спроса. Однако при наличии хорошего спроса можно быстро нарастить объёмы продукции. Ещё не до конца известно, на сколько дороже или дешевле обойдётся данный продукт в

сравнении с уже имеющимися аналогами на этапе производства и эксплуатации. Возможно продукция будет долго захватывать рынок потребителей, однако с большой вероятностью можно заявить, что рано или поздно данные антифрикционные материалы завоюют целевой рынок особенно в сферах в которых необходимы высокие износостойкость, надёжность, малые потери и универсальность конструкции.

### 4.3. Инициация проекта

#### 4.3.1. Цели и результаты проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

В получении результата заинтересованы следующие стороны, представленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Университет	Наличие НИОКР
Магистрант	Защита магистерской диссертации с присвоением степени магистра.
Потребители	Повышение качества изделия с одновременным снижением ресурсозатрат.
Государство	Возможность импортозамещения

В таблице 4.5 представлена информация о иерархии целей проекта и критериях достижения целей.



Таблица 4.5 – Цели и результаты проекта.

<p><b>Цели проекта:</b></p>	<p>1. Определить составы смесей порошков Al-Si с различным содержанием кремния (0,5, 12 и 23вес. %) и 40 вес. % Sn, а также режимы их спекания, позволяющие получать высокоплотные композиты с устойчивой к внешним деформационным воздействиям алюминиевой матрицей.</p> <p>2. Исследовать влияние последующей деформационной обработки методами горячего доуплотнения (ГД) и равноканального углового прессования (РКУП) на структуру и механические свойства спеченных композитов (Al-Si)-40Sn.</p> <p>3. Исследовать влияние содержания кремния, а также последующей деформационной обработки на трибологические свойства спеченных композитов (Al-Si)-40Sn.</p>
<p><b>Ожидаемые результаты проекта:</b></p>	<p>Получение композиционных материалов, которые будут отвечать всем технологическим свойствам, предъявляемым к износостойким материалам (высокая теплопроводность, усталостная прочность, коррозионная стойкость)</p>
<p><b>Критерии приемки результата проекта:</b></p>	<p>Законченная научно-исследовательская работа, опробованная на международных конференциях</p>
<p><b>Требования к результату проекта:</b></p>	<p><b>Требование:</b></p>
	<p>Результат проекта должен иметь актуальное теоретическое и практическое значение</p>
	<p>Выполнение проекта произведено в срок</p>

### 4.3.2. Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого

участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте.

Таблица 4.6 – Рабочая группа проекта

<b>ФИО, основное место работы, должность</b>	<b>Роль в проекте</b>	<b>Функции</b>	<b>Трудо-затраты, час.</b>
Русин Николай Мартемьянович	Заказчик проекта	укрупненный анализ проектов по показателям сроков, освоению затрат и финансированию	
Коростелева Елена Николаевна	Руководитель проекта	отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта	1024
Караваев Владимир Евгеньевич	Исполнитель по проекту	выполняет отдельные работы по проекту	1624
Скоренцев Александр Леонидович	Инженер-технолог	Отвечает за работу оборудования, выполняет технологические работы	224

### 4.3.3. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта.

Таблица 4.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
Бюджет проекта	600000 тыс. руб.
Источник финансирования	ИФПМ СО РАН
Сроки проекта:	
Дата утверждения плана управления проектом	13.09.2016
Дата завершения проекта	20.05.2018

#### 4.4 Планирование управления научно-техническим проектом

##### Иерархическая структура работ проекта

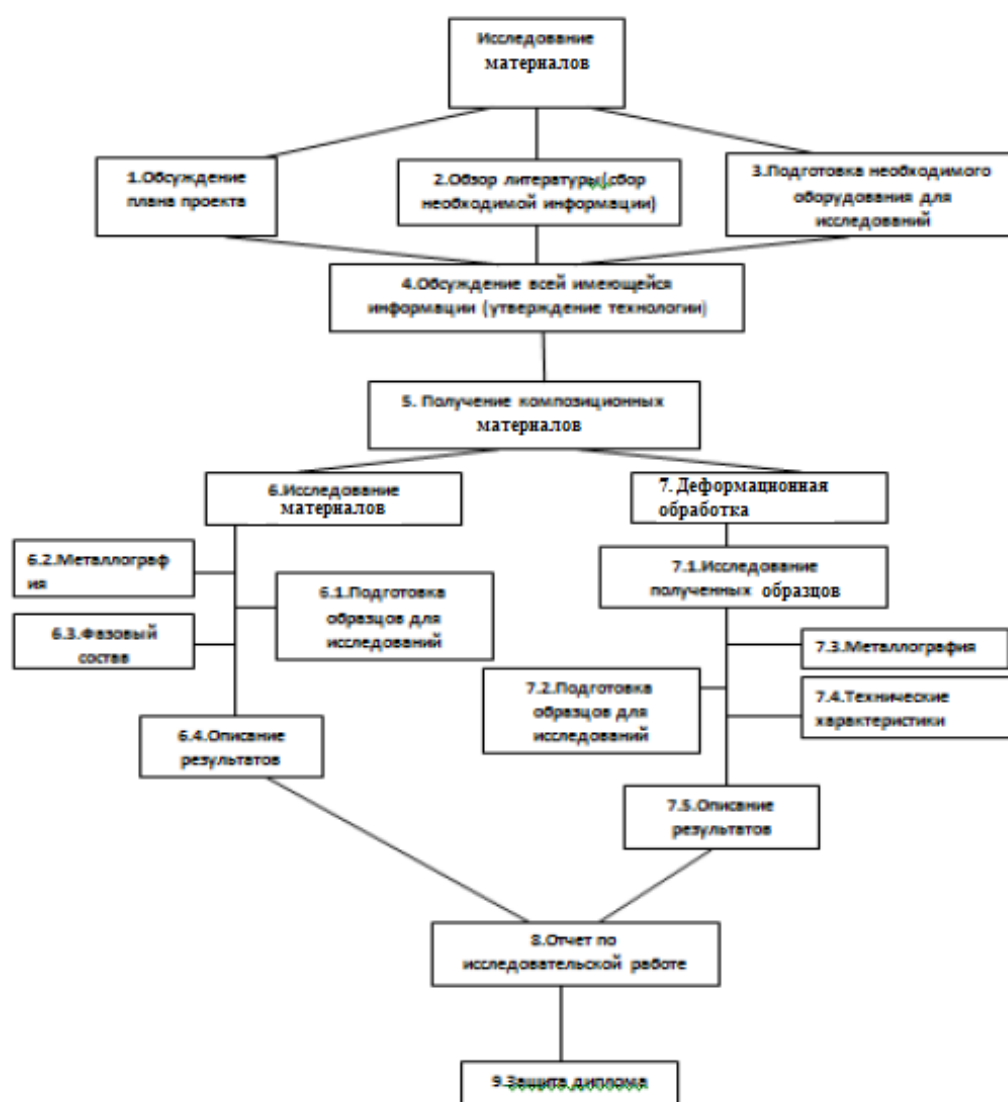


Рисунок 4.1 – Иерархическая структура работ проекта

## Контрольные события проекта

Таблица 4.8 – Контрольные события проекта

Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
Обсуждение плана проект	13.09.16	Утверждение участников исследования
Обзор литературы (сбор необходимой информации)	01.10.16	Отчет по изученной литературе.
Получение композиционных материалов	15.10.16	Композиционные материалы
Исследование полученных материалов	17.11.16	Исследуемые образцы, иллюстрации (графики, картинки)
Описание результатов	24.04.17	Отчет
Деформационная обработка	08.09.17	Уплотненные композиционные материалы
Исследование полученных материалов после деформационной обработки	20.11.17	Исследуемые образцы, иллюстрации (графики, картинки)
Описание результатов	21.02.18	Отчет
Отчет по исследовательской работе	23.04.18	Отчет
Защита диплома	08.06.18	диплом

## Бюджет научного исследования

Таблица 4.9 – расчет сырья, материалов, комплектующих изделий и покупных полуфабрикатов

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Порошок олова марки ПО2	1кг	836	836
Порошок алюминия АСД 4	1кг	287	287
Силумин	1кг	539	539
Графит	1 кг	47	47
Алмазная паста	5	300	1500
Наждачная бумага	10	25	250
Всего за материалы			3459

## Расчет заработной платы

Заработная плата рабочим рассчитана по тарифным ставкам и отработанному времени.

Таблица 4.10 – Расчет заработной платы персоналу

Исполнители	Количество	Зарплата, руб./мес.	Количество отработанных дней	Всего з.п, руб	Дополнительная з.п	Отчисления на социальные нужды
Руководитель	1	25000	128	145454	17455	43636
Исполнитель	1	9000	203	83045	9965	24913
Инженер-технолог	1	15000	28	19090	2290	5727
Итого:				247589	29710	74276

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 12% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (4.2)$$

Отчисления на социальные нужды:

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.3)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). Отчисления на социальные нужды составляет 30%.

## Накладные расходы

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

Таблица 4.11 – Накладные расходы

Исполнитель	Всего з.п.,руб.	Дополнительная З.п., руб.	Накладные расходы, руб.
Руководитель1	145454	17455	130327
Исполнитель	83045	9965	74408
Инженер-технолог	19090	2290	17104
Итого			221839

Таблица 4.12 – Полная смета затрат

Статьи	Затраты, руб
Основная заработная плата	247589
Дополнительная заработная плата	29710
Отчисления на социальные нужды	74276
Затраты на электроэнергию	12850
Прочие накладные расходы	221839
Итого	586264

### Оценка сравнительной эффективности исследования

Аналог 1 – сплав, полученный литьем

Аналог 2 – сплав, полученный с помощью порошковой металлургии.

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	5	4	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	4	4
3. Помехоустойчивость	0,1	4	3	4
4. Энергосбережение	0,2	5	3	4
5. Надежность	0,2	4	3	5
6. Материалоемкость	0,2	4	4	5
Итого баллов	1			

$$I_{TP} = 0,2 * 5 + 0,1 * 4 + 0,1 * 4 + 0,2 * 5 + 0,2 * 4 + 0,2 * 4 = 4,8$$

$$\text{Аналог 1} = 0,2 * 4 + 0,1 * 4 + 0,1 * 3 + 0,2 * 3 + 0,2 * 3 + 0,2 * 4 = 3,5$$

$$\text{Аналог 2} = 0,2 * 4 + 0,1 * 4 + 0,1 * 4 + 0,2 * 4 + 0,2 * 5 + 0,2 * 5 = 4,4$$

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4АМ61	Караваев Владимир Евгеньевич

<b>Институт</b>	<b>ИШПНТ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОМ</b>
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	машиностроение

**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"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>Исследование проводилось на базе лаборатории физики наноструктурных функциональных материалов ИФПМ СО РАН. При выполнении исследовательской работы существует вероятность воздействия следующих производственных факторов: шума, недостаточной освещенности, электрического тока, вредных веществ, физических и эмоциональных перегрузок, умственного перенапряжения. Рабочее помещение по опасности относится к 1 группе, т.е. пожарная нагрузка относительно мала.</p> <p>В лаборатории в процессе работы с порошковыми материалами присутствуют пыль и аэрозоли. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры.</p>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>При выполнении исследования все данные были приняты по нормативам и стандартам РФ.</p>

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

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<p>При выполнении работы для исследования образцов, в лаборатории используется 4%раствор азотной кислоты в спирте. Она является едким веществом и относится к веществам 3-го класса опасности. Азотная кислота вызывает сильные ожоги при контакте с кожей, а её пары поражают слизистые оболочки, дыхательные пути, вызывают конъюнктивит. Предельно допустимая концентрация вредного вещества третьего класса опасности в воздухе рабочей зоны составляет от 1,1 до 10 мг/м<sup>3</sup>. Для работы с опасными веществами применяют такие средства индивидуальной защиты, как латексные перчатки, защитные маски. Все работы проводятся в вытяжном шкафу.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> </ul>	<p>Рабочее место удовлетворяет всем требованиям безопасности жизнедеятельности: нет доступа к токоведущим частям, все источники питания пронумерованы, корпуса компьютеров</p>



<ul style="list-style-type: none"> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	<p>заземлены. Рабочее помещение по опасности относится к 1 группе, т.е. пожарная нагрузка относительно мала. Помещение лаборатории можно отнести к первой ступени огнестойкости. Предусмотренные средства пожаротушения (согласно требованиям противопожарной безопасности СНиП 2.01.02.-85).</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>В лаборатории в процессе работы с порошками неизбежно образуются взвеси пыли и аэрозолей. Для их удаления работы производятся в шкафах с вытяжной вентиляцией, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры. Вследствие использования работниками душевых, туалетов, специальных веществ для обработки материалов, а также средств хозяйственного назначения, образуются жидкие отходы для удаления которых применяют канализационную систему. Система канализации подсоединена к городской канализационной сети, поэтому полная очистка сточных вод на нем не проводится.</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</li> </ul>	<p>Возможные чрезвычайные ситуации при выполнении проекта являются: поражение электрическим током, короткое замыкание электрической цепи, и как следствие, пожар. Для предотвращения ЧС необходимо осуществлять меры по технике безопасности на рабочем месте.</p>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	<p>Расстояния между рабочими зонами, параметры освещения и микроклимата соответствуют нормам. Эффективный и безопасный труд возможен только в том случае, если производственные условия на рабочем месте отвечают всем требованиям международных стандартов в области охраны труда.</p>

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

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Караваев В.Е.		

## **5. Социальная ответственность**

### **5.1. Введение**

При проведении исследовательских работ для магистерской диссертации было использовано следующее оборудование: пресс гидравлический MC 500, универсальная испытательная машина Walter+Bai AG LFM-125, микроскоп AXIOVERT-200MAT, шлифовально-полировальный станок MECAPOL P 230, триботестер фирмы «Tribotechnic».

В процессе подготовки исследуемых образцов выполняется настройка оборудования, работа с ручным инструментом и работа с электронно-вычислительной машиной (ЭВМ).

### **5.2. Техногенная безопасность**

#### **5.2.1 Анализ вредных факторов производственной среды**

Существует множество возможных проявлений вредных факторов в рабочей зоне, таких как: электромагнитное излучение, производственные метеоусловия, недостаточное или чрезмерное освещение, выброс вредных веществ, виброакустические поля и т.п. При выполнении исследовательской работы очевидно влияние следующих факторов: шум, тепловыделение, недостаточная или чрезмерная освещенность рабочего места, воздействие электрического тока, физическая и эмоциональная перегрузка.

Все опасные и вредные производственные факторы в соответствии с ГОСТ 12.0.003-74 подразделяются на физические, химические, биологические и психофизиологические.

К физическим факторам можно отнести опасность поражения электрическим током, поскольку работать приходится с оборудованием, запитанным от электрической сети. Воздействие излучений от монитора ЭВМ также относится к этой категории.

К химическим факторам относится наличие в воздухе металлической пыли, которая образуется при шлифовании или полировании образцов. При попадании в организм через дыхательные органы или поры кожи, пыль может вызвать профессиональные заболевания. Пыль может легко подниматься с пола вверх и проникать в легкие, когда человек дышит. Также при травлении образцов, можно насытиться парами кислот.

К психофизическим факторам можно отнести чрезмерное воздействие шума, монотонность работы, умственное перенапряжение и т.п. При обработке данных, полученных на микроскопе, оператор выполняет монотонную работу, что может вызвать возникновение нервных расстройств или переутомляемость.

### **Шум**

Источником шума является любой процесс, вызывающий местное изменение давления или механические колебания в твердых, жидких и газообразных средах. Шум имеет определенную частоту, или спектр, выражаемый в герцах, и интенсивность — уровень звукового давления, измеряемый в децибелах. Для человека область слышимых звуков определяется в интервале от 16 до 20000 Гц [51].

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются вентиляторы системы охлаждения, шлифовально-полировальный станок МЕСАРОЛ Р 230 и пресс гидравлический МС 500.

Шум оказывает на организм человека негативное воздействие и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе тугоухость и глухоту. Под влиянием шума учащаются пульс и дыхание, повышается расход энергии. Длительное воздействие шума оказывает вредное влияние на центральную нервную систему и психику человека. В результате воздействия шума у человека появляются симптомы переутомления и истощения нервной системы. Со стороны психики наблюдается подавленное настроение, понижение внимания, задерживаются интеллектуальные процессы, повышается нервная возбудимость. Шум снижает работоспособность и производительность труда, препятствует нормальному отдыху и нарушает сон. Под влиянием шума

значительной силы наблюдается изменение нормальной деятельности различных органов и систем (изменение секреции желудочного сока, повышение кровяного давления и т. п.).

Уровень шума в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, не должен превышать 50 - 60 дБ[51].

В целях уменьшения или устранения шума в лаборатории применяются следующие меры: машины, производящие сильный шум, находятся в отдельной комнате, изолированной от помещений, в которых находится рабочий персонал, при длительном использовании шумопроизводящего оборудования, рабочим выдаются средства индивидуальной защиты, в виде наушников или затычек.

### **Вредные вещества**

Вредными называются те вещества, которые при контакте с организмом могут вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения от нормального состояния здоровья, как в процессе работы, так и в отдалённые сроки жизни настоящего и последующего поколений.

Токсическое действие вредных веществ характеризуется показателями токсикометрии, в соответствии с которыми вещества классифицируют на чрезвычайно опасные (1-го класса), высокоопасные (2-го класса), умеренно опасные (3-го класса) и малоопасные (4-го класса). Эффект токсичного действия различных веществ зависит от количества попавшего в организм вещества.

Для выявления структуры полученных образцов, применяется метод травления азотной кислотой. Она является едким веществом и относится к веществам 3-го класса опасности. Азотная кислота вызывает сильные ожоги при контакте с кожей, а её пары поражают слизистые оболочки дыхательных путей, вызывают конъюнктивит. Предельно допустимая концентрация вредного вещества третьего класса опасности в воздухе рабочей зоны составляет от 1,1 до 10 мг/м<sup>3</sup> [51].

Для работы с опасными веществами применяют такие средства индивидуальной защиты, как латексные перчатки, защитные маски или респираторы. Все работы проводятся в вентилируемом вытяжном помещении.

**Первая помощь** - при попадании азотной кислоты в глаза их следует промыть проточной водой в течение 10 – 30 мин.; при попадании на кожу, пораженную поверхность нужно промыть водой, добавив в ее состав питьевую соду, мыло. При проглатывании азотной кислоты показано промывание желудка обильным количеством воды, инъекции морфина, атропина.

### **Микроклимат**

Микроклимат – это сочетание температуры, влажности и скорости движения воздуха в рабочих помещениях. Микроклимат влияет на процессы теплообмена и характер работ.

Рассмотрим воздействие факторов поподробнее:

1) воздействие высокой температуры быстро утомляет, может привести к перегреву организма, тепловому удару или профессиональным заболеваниям;

2) низкая температура – местное или общее охлаждение организма, причина простудных заболеваний или обморожения;

3) высокая относительная влажность при высокой температуре способствует перегреву организма; при низкой температуре усиливает теплоотдачу с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению;

4) низкая влажность вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей.

Параметры микроклимата могут изменяться в широких пределах, в то время как необходимым условием жизнедеятельности человека является поддержание постоянства температуры тела благодаря терморегуляции, т.е. способности организма регулировать отдачу тепла в окружающую среду. Принцип нормирования микроклимата – создание оптимальных условий для теплообмена тела человека с окружающей средой.

ЭВМ является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В санитарных нормах СН-245-71 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия [51].

Таблица 5.1 – Оптимальные параметры микроклимата в помещениях с ЭВМ

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Iб (140-174)	Температура воздуха в помещении	21-23°C
		Относительная влажность	40-60%
		Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Теплый	Iб (140-174)	Температура воздуха в помещении	22-24°C
		Относительная влажность	40-60%
		Скорость движения воздуха	0,1-0,2 м/с

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период восьмичасового рабочего дня. Они не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Таблица 5.2 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °C		Температура поверхности, °C	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более
Холодный	Iб (140 - 174)	19,0 - 20,9	23,1 - 24,0	18,0- 25,0	15 - 75	0,1	0,2
Теплый	Iб (140 - 174)	20,0 - 21,9	24,1 - 28,0	19,0- 29,0	15 - 75*	0,1	0,3

Воздух, поступающий в рабочие помещения операторов ЭВМ, должен быть очищен от загрязнений, в том числе от пыли и микроорганизмов.

Кондиционирование воздуха должно обеспечивать поддержание параметров микроклимата в необходимых пределах в течение всех сезонов года, очистку воздуха от пыли и вредных веществ, создание необходимого избыточного давления в чистых помещениях для исключения поступления неочищенного воздуха. Температура подаваемого воздуха должна быть не ниже 19 °С [51].

В помещении имеется только естественная вентиляция (форточки окон, двери). Отопление зимой осуществляется через систему общего отопления (городская). В крайнем случае, устанавливаются электрические обогреватели в зимнее время и вентилятор в летнее [51].

Таблица 5.3 – Нормы подачи свежего воздуха в помещения с ЭВМ

Характеристика помещения	Объемный расход воздуха в помещении, м <sup>3</sup> /на одного человека в час
Объем до 20м <sup>3</sup> на человека	Не менее 30
20-40м <sup>3</sup> на человека	Не менее 20
Более 40м <sup>3</sup> на человека	Естественная вентиляция

### **Освещение на рабочем месте**

Недостаточное освещение приводит к перенапряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать рабочего.

В соответствии со СНиП II-4-79 в вычислительных центрах применяется система комбинированного освещения. Для работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3 - 0,5 мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5 %, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта

различия 0,5 - 1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0 %. В качестве источников искусственного освещения обычно используются люминесцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ, которые попарно объединяются в светильники, которые в свою очередь должны располагаться над рабочими зонами равномерно [51].

В помещениях, где установлены ЭВМ действуют следующие требования:

- при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная – 750 лк;
- при выполнении работ средней точности - 200 и 300 лк соответственно.

При этом крайне важно, чтобы все поле зрения было освещено равномерно. Это значит, что степень освещения помещения и яркость экрана ЭВМ должны быть примерно одинаковыми, так как яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости.

Для работы с ЭВМ рекомендуются помещения с односторонним боковым естественным освещением с северной, северо-восточной или северо-западной ориентацией светопроемов. Площадь световых проемов должна составлять 25 % от площади пола. Удовлетворительное естественное освещение проще создать в небольших помещениях на 5-6 рабочих мест, а больших помещений с числом работающих более 20, лучше избегать. В случае, если экран ЭВМ обращен к окну, должны быть предусмотрены специальные экранизирующие устройства.

### **Расчет общего равномерного освещения**

Для проведения расчета освещенности рабочего места необходимо выбрать систему освещения, определить необходимое число светильников, их тип и размещение. Рассчитаем параметры искусственного освещения. Существует два исполнения искусственного освещения: с использованием ламп накаливания или люминесцентных ламп. У люминесцентных ламп существует ряд существенных преимуществ:

- Близкий к дневному свету спектральный состав;



- Коэффициент полезного действия (КПД) выше в 1,5 – 2 раза, чем у ламп накаливания;
- Повышенная светоотдача (в сравнении с лампами накаливания);
- Длительный срок службы.

В соответствии с указаниями [51] произведем расчет освещения. Помещение имеет площадь  $48\text{ м}^2$ , ширина составляет 6м, длина – 8м, высота – 2,5 м. Воспользуемся методом светового потока. В помещении лаборатории используются люминесцентные лампы ШОД, использование которых допускается при умеренной влажности и запыленности.

Величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, так как со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп снижается освещенность. Значение коэффициента запаса, выбираемого для помещения с малым выделением пыли, при люминесцентных лампах  $KЗ = 1,5$ .

Расположение светильников должно соответствовать двум критериям:

1. Обеспечение высокого качества освещения, ограничение ослепленности и достаточной направленности света на рабочие места;
2. Наиболее экономичное создание нормированной освещенности.

Расположим светильники параллельно стенам. Расстояние между светильниками рассчитаем по формуле:

$$\lambda = L/h$$

где  $L$  - расстояние между светильниками, м;

$h$  - высота подвеса светильника над рабочей поверхностью, м.

Находим  $\lambda = 1,2$  (при  $h = 2,5$  м)

Отсюда следует, что  $L = \lambda \cdot h = 1,2 \cdot 2,5 = 3$  (м).

Расстояние от стен помещения до крайних светильников  $1/3L$ .

Изобразим в соответствии с исходными данными план помещения, укажем на нем расположение светильников и определим их число.

Воспользуемся методом коэффициента использования светового потока. С его помощью можно рассчитать, как световой поток ламп, необходимый для

создания заданной освещенности горизонтальной поверхности с учетом света, отраженного стенами и потолком, так и освещенность при известном потоке.

Для определения количества светильников определим световой поток, падающий на поверхность по формуле:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{\eta \cdot n},$$

где,  $F$  - рассчитываемый световой поток, лм;

$E$  - нормированная минимальная освещенность, лк (определяется по таблице [51]). Работу специалиста, в соответствии с этой таблицей, можно отнести к разряду точных работ, следовательно, минимальная освещенность будет

$$E = 400 \text{ лк};$$

$S$  - площадь освещаемого помещения (в нашем случае  $S = 48 \text{ м}^2$ );

$Z$  - отношение средней освещенности к минимальной (обычно принимается равным 1,1-1,2, пусть  $Z = 1,1$ );

$K$  - коэффициент запаса, учитывающий уменьшение светового потока лампы в результате загрязнения светильников в процессе эксплуатации (его значение зависит от типа помещения и характера проводимых в нем работ и в нашем случае  $K = 1,5$ );

$\eta$  - коэффициент использования, (выражается отношением светового потока, падающего на расчетную поверхность, к суммарному потоку всех ламп и исчисляется в долях единицы; зависит от характеристик светильника, размеров помещения, окраски стен и потолка, характеризуемых коэффициентами отражения от стен ( $P_C$ ) и потолка ( $P_{II}$ )). Их оценивают субъективно и определяют по таблице. Так, для свежепобеленного потолка и со свежепобеленными окнами без штор  $P_C = 50\%$  и  $P_{II} = 70\%$  соответственно.

Значение  $\eta$  определим по таблице коэффициентов использования различных светильников. Для этого вычислим индекс помещения по формуле:

$$I = \frac{S}{h(A+B)}$$

Где,  $S$  - площадь помещения,  $S = 48 \text{ м}^2$ ;

$h$  - расчетная высота подвеса,  $h = 2,5$  м;

$A$  - ширина помещения,  $A = 6$  м;

$B$  - длина помещения,  $B = 8$  м.

Подставив значения получим:

$$I = \frac{48}{2,5 * (6 + 8)} = 1,37$$

Зная индекс помещения  $I$ , по таблице [51] находим  $\eta = 0,6$

При выборе осветительных приборов используем светильники типа ОД. Каждый светильник комплектуется двумя лампами.

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 3 светильника типа ОДР. Длина одного светильника 1 м., ширина 0,5 м. При этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Изобразим схему расположения светильников на рисунке ниже.

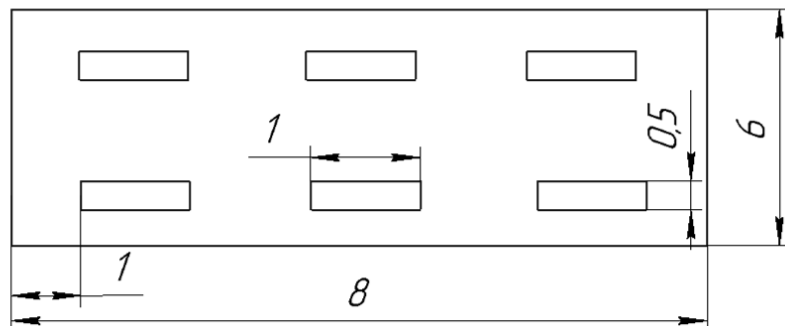


Рисунок 5.1 – Схема расположения светильников

Подставим все значения в формулу для определения светового потока  $F$ :

$$F = \frac{400 * 1,5 * 48 * 1,1}{0,6 * 12} = 4400(\text{лм})$$

В соответствии со световым потоком выбираем стандартную лампу – ЛБ -80-4 с потоком 4960 лм.

## 5.2.2 Анализ опасных факторов производственной среды

### Электрический ток

Опасность поражения электрическим током зависит от таких факторов, как сырость, жара, едкие пары и газы, а также токопроводящая пыль. При наличии вышеперечисленных факторов возникает возможность перехода напряжения на нетоковедущие части электрооборудования (корпуса, станины, кожухи), с которыми рабочий находится в контакте. В таких условиях также понижается электрическое сопротивление тела человека, дополнительно увеличивая опасность поражения током.

Предельно допустимые значения величин напряжения и тока согласно ГОСТ 12.1.038-82 приведены в таблице ниже:

Таблица 5.4 – Предельно допустимые величины напряжения и тока

Допустимое время действия, с	Длительность	До 30	1	0,5	0,2	0,1
Величина тока, мА	1	6	50	100	250	500
Величина напряжения, В	6	36	50	100	250	500

Действующими правилами устройства электроустановок (ПУЭ) все помещения подразделены на следующие три класса:

- I. Помещения без повышенной опасности: сухие, с нормальной температурой воздуха, с полами, которые не проводят ток;
- II. Помещения с повышенной опасностью: сырые с относительной влажностью воздуха (длительной) более 75 %; жаркие с температурой воздуха, длительно превышающей +30 °С; с полами из токопроводящих материалов; с большим количеством выделяющейся токопроводящей технологической пыли, оседающей на проводах и проникающей внутрь электроустановок; с размещением электроустановок с металлическими корпусами, имеющих соединение с землей, металлоконструкций зданий и технологического оборудования, допускающих одновременное соприкосновение с ними.

III. Помещения особо опасные: особо сырые с относительной влажностью воздуха, близкой к 100 %, химически активной средой, одновременным наличием двух и более условий, свойственных помещениям с повышенной опасностью.

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА. [51]

Одной из особенностей поражения электрическим током является отсутствие внешних признаков грозящей опасности, которые человек мог бы заблаговременно обнаружить с помощью органов чувств.

Ток приводит к серьезным повреждениям центральной нервной системы, а также таких жизненно важных органов как сердце и легкие. Поэтому, второй особенностью воздействия тока на человека является тяжесть поражения.

Третья особенность поражения человека электрическим током заключается в том, что токи промышленной частоты силой в 10-15мА способны вызвать резко интенсивные судороги мышц.

По условиям электробезопасности установки, используемой при выполнении работы, относятся к категории установок, работающих с напряжением до 1000 В. Устройства, относятся к 1 классу, так как имеют рабочую изоляцию и место заземления.

Безопасность эксплуатации при нормальном режиме работы установок обеспечивается следующими защитными мерами:

1. Применение изоляции;
2. Недоступность токоведущих частей;
3. Применение малых напряжений;
4. Изоляция электрических частей от земли.

Рабочее помещение по опасности относится к 1 группе, т.е. пожарная нагрузка относительно мала.

Рабочее место удовлетворяет всем требованиям безопасности жизнедеятельности: нет доступа к токоведущим частям, все источники питания пронумерованы, корпуса компьютеров заземлены.

### **Пожаробезопасность**

Пожар – это явление неконтролируемого процесса горения, причиняющего материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства.

Согласно нормам пожарной безопасности, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [51].

Для большинства помещений вычислительного центра установлена категория пожарной опасности В. Характерной особенностью помещений является их малый размер. Горючими компонентами в комнатах являются двери, перегородки, отделка, эстетическая отделка помещений, изоляция кабелей.

Источниками воспламенения могут быть электросхемы ЭВМ, устройства электропитания, в которых в результате неполадки образуются перегретые элементы, возникают электрические искры и дуги, способные вызвать возгорание горючих материалов. Для отвода тепла от ЭВМ используются системы охлаждения и кондиционирования воздуха.

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. Во всех служебных помещениях обязательно должен быть «План эвакуации людей при пожаре», регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения средств пожаротушения. Предусмотренные средства пожаротушения (согласно требованиям противопожарной безопасности СНиП 2.01.02-85): огнетушитель ручной углекислотный ОУ-5, пожарный кран с рукавом и ящик с песком (в коридоре). Кроме того, каждое помещение оборудовано системой противопожарной сигнализации.

Одна из наиболее важных задач пожарной защиты - защита строительных помещений от разрушений и обеспечение их достаточной прочности в условиях воздействия высоких температур при пожаре. Учитывая высокую стоимость электронного оборудования ВЦ, а также категорию его пожарной опасности, здания для ВЦ и части здания другого назначения, в которых предусмотрено размещение ЭВМ, должны быть первой и второй степени огнестойкости. Для изготовления строительных конструкций используются, как правило, кирпич, железобетон, стекло, металл и другие негорючие материалы. Применение дерева должно быть ограничено, а в случае использования необходимо пропитывать его огнезащитными составами.

### **5.2.3 Региональная безопасность**

Любое предприятие, осуществляющее деятельность, неизбежно наносит тот или иной вред окружающей среде. В настоящей работе основными факторами воздействия на среду являются:

- токсичность или другое физиологическое действие порошков ряда металлов и неметаллов, газов, применяемых в производстве;
- взрывоопасность и пожароопасность некоторых материалов и газов;
- слив кислот, щелочей, солей, отходов вредных веществ в общую систему канализации;
- пыль на рабочем месте.

Наибольшее внимание в природоохране уделяется охране атмосферы, в которую включено:

- уменьшение и полное прекращение выбросов вредных веществ в атмосферу;
- сохранение и увеличение биомассы производителей кислорода и поглотителей углекислоты;
- сохранение и восстановление оптимальной циркуляции атмосферы в региональном масштабе;

- утилизация отходов вредных производств.

Полностью исключить факторы загрязнения невозможно, однако есть методы, позволяющие их существенно снизить. Оснащение производственных площадок современными пылеуловителями, использование современных фильтрационных установок, новых видов фильтров и мембран.

В лаборатории в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры.

#### **5.2.4 Организационные мероприятия обеспечения безопасности**

При принятии на работу с каждым сотрудником проводится первичный инструктаж по технике безопасности, что фиксируется в журнале.

Сотруднику разъясняются основные опасные факторы среды, правила оказания первой помощи, расположения средств пожаротушения, планов эвакуации и аптечек первой помощи.

На стенах лаборатории вывешены инструкции по технике безопасности, план эвакуации при пожаре.

Меры по технике безопасности на рабочем месте:

1. К работе с электроустановками допускаются лица, имеющие третью либо четвертую группу допуска, устанавливаемые квалификационной комиссией.
2. Лица, не имеющие непосредственного отношения к обслуживанию электроустановок, к работе с ними не допускаются.
3. Все питающие части должны быть заземлены. Сопротивление заземления должно не превышать 4 Ом.
4. При замене (установке) плат расширения необходимо пользоваться браслетом заземления, либо перед осуществлением этой операции избавиться от накопленного на теле статического заряда посредством



- прикосновения к зануленной части компьютера, в противном случае возможно повреждение чувствительных к статике микроэлементов ЭВМ.
5. Для исключения поражения электрическим током запрещается: часто включать и выключать ЭВМ без необходимости, прикасаться к экрану и к тыльной стороне блоков компьютера, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании мокрыми руками, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании, имеющих нарушения целостности корпуса, нарушения изоляции проводов, неисправную индикацию включения питания, с признаками электрического напряжения на корпусе, класть на средства вычислительной техники и периферийном оборудовании посторонние предметы.
  6. Запрещается под напряжением очищать от пыли и загрязнения электрооборудование.
  7. Запрещается проверять работоспособность электрооборудования в непригодных для эксплуатации помещениях с токопроводящими полами, сырых, не позволяющих заземлить доступные металлические части.
  8. Недопустимо под напряжением проводить ремонт средств вычислительной техники и периферийного оборудования. Ремонт электроаппаратуры производится только специалистами-техниками с соблюдением необходимых технических требований.
  9. Во избежание поражения электрическим током, при пользовании электроприборами нельзя касаться одновременно каких-либо трубопроводов, батарей отопления, металлических конструкций, соединенных с землей.

## **5.2.5 Особенности законодательного регулирования проектных решений**

В соответствии с законодательством Российской Федерации нормальная продолжительность рабочего дня не может превышать 40 часов в неделю. Сокращенная продолжительность рабочего дня устанавливается для лиц в возрасте 16-18 лет и составляет не более 36 часов в неделю, а для учеников от 14 до 15 лет, а также работников в возрасте 15 и 16 лет – 24 часа в неделю. При наличии вредных условий труда рабочий день лимитирован 26 часами в неделю. Накануне официальных праздничных дней продолжительность рабочего дня сокращается на один час. При работе в ночное время (с 22 до 6 утра) продолжительность рабочего дня также сокращается на час.

Указом Министерства здравоохранения от 29 декабря 1993 года №256 создан перечень тяжелых работ и опасных условий труда, согласно которому запрещается привлекать женщин к работам, которые связаны с постоянным (больше 2-х раз) на протяжении одного часа перемещением грузов массой свыше 7 кг. Если женщина занята подъемом или перемещением грузов до двух раз в течение часа, то ей может поручаться такая работа при весе груза до 10 кг. Причем в обоих случаях суммарная масса груза, который перемещается на протяжении каждого часа рабочей смены, не должна превышать 350 кг - с поверхности рабочего места и 175 кг с пола. Действующее законодательство особое внимание уделяет защите жизни и здоровья несовершеннолетних, то есть лиц, не достигших возраста 18 лет. Допускается с согласия одного из родителей принятие на работу учеников общеобразовательных школ для выполнения работы, которая не наносит ущерб их здоровью, в свободное от учебы время при достижении ими 14 - летнего возраста (на время школьных каникул). Как правило, несовершеннолетние принимаются на работу после достижения 16 лет. Их запрещается привлекать к работам, предусмотренным Перечнем тяжелых работ и работ с вредными и опасными условиями труда.

## 5.2.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При выполнении работ возможны следующие чрезвычайные ситуации:

Поражение электрическим током, короткое замыкание и пожар. Для предотвращения ЧС необходимо осуществлять меры по технике безопасности на рабочем месте, указанные в следующем разделе.

При возникновении пожара крайне важно соблюдать правила поведения при данном ЧС, так как данное явление может развиваться непредсказуемо и стремительно. Действия при пожаре прописаны в инструкции, которую обязан знать каждый сотрудник.

Действия персонала при пожаре на предприятии:

- услышав крики: «Пожар», ни в коем случае не поддаваться панике, сохранять спокойствие;
- осмотреться вокруг. Заметив телефон или кнопку пожарной безопасности, действовать незамедлительно - сообщить службам о возгорании;
- попробовать самостоятельно потушить возгорание, используя огнетушитель, землю;
- если ликвидировать пожар не получается, покинуть помещение через эвакуационный выход;
- не поддаваться панике, стараться успокоить других;
- двигаться к выходу, дышать через рукав одежды или носовой платок;
- если в помещении сильная задымленность, перемещаться, опираясь на стены или поручни;
- оказавшись на свежем воздухе, немедленно вызвать «Скорую помощь».

## Заключение

1. Жидкофазное спекание прессовок из смеси порошков сплавов (Al-Si) и 40 масс. % олова приводит к существенному повышению пластичности образцов, но не позволяет значительно снизить их пористость. В результате, механические свойства и износостойкость при сухом трении композитов (Al-Si)-40Sn уступали значениям плотного (менее 1 % пор) спечённого прототипа Al-40Sn, несмотря на его менее прочную и твёрдую матрицу.
2. Доуплотнение при повышенной температуре спеченных композитов (Al-Si)-40Sn в закрытой пресс-форме приводит к значительному снижению их пористости и повышению прочности при испытании на сжатие.
3. С увеличением содержания кремния прочность подвергнутых горячему доуплотнению композитов (Al-Si)-40Sn увеличивается, а пластичность снижается.
4. Интенсивность изнашивания спеченных композитов (Al-Si)-40Sn при сухом трении по стали значительно снижается, если их предварительно подвергнуть горячему доуплотнению. С увеличением содержания в образцах кремния до 12 % их износостойкость возрастает и превышает ее значения, полученные в случае двухфазного композита Al-40Sn.
5. Спеченные композиты (Al-12Si)-40Sn и (Al-23Si)-40Sn разрушаются при их интенсивной пластической деформации методом равноканального прессования ввиду низкой пластичности. В то время как в результате такой обработки прочность и износостойкость при сухом трении по стали образца (Al-0,5Si)-40Sn значительно возрастают и превышают значения, полученные в случае материала, подвергнутого горячему доуплотнению.

## Список публикаций студента

1. Русин, Н. М., Скоренцев А. Л., Караваев, В. Е./ Структура и механические свойства спеченного композита (Al-12Si)-Sn после горячей допрессовки // Цветные металлы и минералы - 2017 [Электронный ресурс] : Сборник докладов Девятого международного конгресса (Красноярск, 11-15 сентября, 2017). – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2017 – [С. 506-511.]

2. Караваев, В. Е., Скоренцев А. Л., Русин, Н. М., Коростелева Е. Н./ Структура и свойства спеченных композитов Al-Si-Sn // Современные технологии и материалы новых поколений: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, г. Томск, 9-13 октября 2017 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2017. — [С. 180-181.]

## Список использованных источников

1. Буше Н.А. и др. Подшипники из алюминиевых сплавов. – М.: Транспорт, 1974. – 256 с.
2. Русин Н.М., Скоренцев А.Л. Способ получения износостойкого антифрикционного сплава // Патент RU 2552208. – опубл. 10.06.2015.
3. Liu X., Zeng M.Q., Ma Y., Zhu M. Wear behavior of Al-Sn alloys with different distribution of Sn dispersoids manipulated by mechanical alloying, *Wear*, 2008, 265, 1857-1863.
4. Noskova N.I., Korshunov A.G., Korznikov A.V. Microstructure and tribological properties of Al-Sn, Al-Sn-Pb, and Sn-Sb-Cu alloys subjected to severe plastic deformation, *Metal science and heat treatment*, 2008, 50(11-12), 593-599.
5. YuanG.-C., ZhangX.-M., LouY.-X., LiZ.-J. Tribological characteristics of new series of Al-Sn-Si alloys // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2003. – Vol. 13. – № 4. – P. 774–780.
6. Dayanand M. Goudar K. Raju S. N. Ojha. Investigation on the Wear Behavior of Spray Formed Al–35Si–4Fe Alloy// *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2015. – 68(6). – P. 1001–1005.
7. Dayanand M. Goudar, V. C. Srivastava, G. B. Rudrakshi, K. Raju, S. N. Ojha. Effect of Tin on the Wear Properties of Spray Formed Al–17Si Alloy// *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2015. – 68(Suppl 1):S3–S7
8. M. Chena, T. Perry, A.T. Alpas. Ultra-mild wear in eutectic Al–Si alloys // *ScienceDirect*. – *Wear* 263 (2007) 552–561
9. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов / Под ред. Д.Г. Громаковского, Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2000. – 268 с.

10. Зозуля В.Д. Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – Киев: Наук. думка, 1989. – 288 с.
11. Тавров В.И. К обоснованию выбора материала для подшипника скольжения. Факторы, определяющие выбор материала // Электронный научно – технический журнал Инженерный вестник. – 2012. – № 12. – 77-48211/513921.
12. Kryachek V.M. Sintered metals and alloys friction Composites: Traditions and New Solutions (review). II. Composite materials // Powder metallurgy and Metal Ceramics. – 2005. – Vol. 44. – Nos. 1-2. – P. 5-15.
13. Marrocco T., Driver L.C., Harris S.J., and McCartney D.G. Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Al-Sn-Based Alloys for Plain Bearing Applications // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – Vol. 15(4). – P. 634-639.
14. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Материаловедение: Учебник для вузов / Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 5-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648 с.
15. Лахтин Ю.М. Материаловедение и термическая обработка металлов. Учебник для вузов / 3-е изд. – М.: «Металлургия », 1983. – 360 с.
16. Скоренцев А.Л. Разработка и исследование структуры, механических и трибологических свойств спеченных и подвергнутых равноканальному угловому прессованию композитов Al-Sn // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Томск – 2016. – 155 с.
17. Федорченко И.М., Баранов Н.Т., Агеева В.С. и др. Триботехнические характеристики порошковых композиционных материалов на основе меди при высокоскоростном трении // Порошковая металлургия. – 1986. – № 7. – С. 52-56
18. Мартюшев Н.В. Влияние морфологии включений легкоплавкой фазы на триботехнические свойства бронз // Приволжский научный вестник. – 2011. – № 2. – С. 8-11.

19. Полухин М.С., Камынин В.В. Влияние структурных факторов на триботехнические свойства антифрикционных чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – С. 43-47.
20. И.И.Беркович, Д.Г.Громаковский. Трибология физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/ Изд-во СамГТУ – Самара, 2000. 268 с.
21. Osorio W.R, Spinelli J.E., Cheung N., Garcia A. Secondary dendrite arm spacing and solute redistribution effects on the corrosion resistance of Al–10 wt% Sn and Al–20 wt% Zn alloys // Mater. Sci. Eng. A. – 2006. – Vol. 420. – P. 179-186.
22. Savaskan T., Bican O. Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al–25Zn–3Cu–(0-5)Si alloys in the As-Cast and Heat-Treated Conditions // Tribol. Lett. – 2010. – Vol. 40. – № 3. – P. 327-336.
23. Kurbatkin I.I., Belov N.A., Ozerskiy O.N., Muravyeva T.I., Stolyarova O.O., and Alabin A.N. Tribological and Structural Study of New Aluminum-Based Antifriction Materials // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35. – № 2. – P. 93-97.
24. Pathak J.P. and Mohan S. Tribological behavior of conventional Al-Sn and equivalent Al-Pb alloys under lubrication // Bull. Mater. Sci. – 2003. – Vol. 26. – № 3. – P. 315-320
25. Rashmi Mittal, Aruna Tomar, and Devendra Singh. Wear Behavior of Disk Shape Spray Formed Al-Si-Pb Alloys // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Vol. 23. – Issue 3. – P. 975-981
26. Avraamov Yu.S., Kravchenkova I.A., Kravchenkov A.N., Korolev S.Yu., Novoselov R.A., Shlyapin A.D. Method of Obtaining Antifriction Al-Zn-Sn Alloy // Mechanical Industry and Engineering Education. – 2012. – № 1. – P. 7-10.



27. Буше Н.А., Миронов А.Е., Маркова Т.Ф. Новый алюминиевый сплав, заменяющий традиционные материалы // Железные дороги мира. - 2003. - № 11. - С. 44-47.
28. Дюжечкин М.К. Горячедеформированные порошковые материалы системы Al-Si И Al-Si-C для гильз цилиндров ДВС // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новочеркасск – 2014. – 139 с.
29. В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Беллавин/ Спеченные материалы из алюминиевых порошков: М.: Metallurgy, 1993. – 320 с.
30. В.Н. Анциферов, Г.Б. Бобров, Л.К. Дружинин и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. Учебник для вузов. М.: Metallurgy, 1987, 792 с.
31. Савицкий А.П. Жидкофазное спекание систем с взаимодействующими компонентами. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 184 с.
32. Гурских А.В. Разработка спеченных Ti-Cu, Ti-Si катодов для ионно-плазменного нанесения наноструктурных нитридных покрытий // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Томск – 2012. – 150 с.
33. Федорченко И.М., Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. – Киев: Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1963. – 420 с.
34. Xu K., Wongpreedee K., Russell A.M. Microstructure and strength of a deformation processed Al-20%Sn in situ composite // Journal of materials science. – 2002. – Vol. 37. – P. 5209-5214.
35. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

36. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Мн.: Наука и техника, 1994. – 232 с.
37. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
38. Hernandez O., Gonzalez G. Microstructural and mechanical behavior of highly deformed Al-Sn alloys // *Materials characterization*. – 2008. – Vol. 59. – P. 534-541.
39. Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, В. Г.Сынков, С. Г. Сынков. Интенсивные пластические деформации материалов при гидропрессовании с кручением // *ФТВД*. - 1998. - Т. 85. - С. 161-17757.
40. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
41. Segal. V.M. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation // *Mater. Sci. Eng.* – 1999. – Vol. 271A. – P. 322-333.
42. Русин Н.М., Вишняков К.В. Особенности распределения деформации в образцах при равноканальной угловой экструзии // Доклады V Всерос. конф. (школы) молодых ученых, 18-22 августа 2003. – Томск. – С. 97-98.
43. Русин Н.М. Исследование особенностей пластического течения на макроскопическом уровне в порошковых телах при равноканальном угловом прессовании // *Перспективные материалы*. – 2007. – № 4. – С. 83-91.
44. Русин Н.М. Влияние маршрутов РКУП на особенности «концевого эффекта» // *Физика металлов и металловедение*. – 2006. – Т. 102. – № 2. – С. 242-249.
45. Русин Н.М. Устройство для интенсивной деформационной проработки пластичных материалов // Патент №70846, В30В 15/02. – опубл. 20.02. 2008.

46. Лякишева Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. – Машиностроение, 2000 г.
47. Русин, Н. М., Скоренцев А. Л., Караваев, В. Е./ Структура и механические свойства спеченного композита (Al-12Si)-Sn после горячей допрессовки // Цветные металлы и минералы - 2017 [Электронный ресурс] : Сборник докладов Девятого международного конгресса (Красноярск, 11-15 сентября, 2017). – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2017 – [С. 506-511.]
48. Караваев, В. Е., Скоренцев А. Л., Русин, Н. М., Коростелева Е. Н./ Структура и свойства спеченных композитов Al-Si-Sn // Современные технологии и материалы новых поколений: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, г. Томск, 9-13 октября 2017 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2017. — [С. 180-181.]
49. Rusin N.M., Skorentsev A.L. Improving the Tribological Properties of Self-lubricating Al-Sn Alloys by their Severe Plastic Processing. Applied Mechanics and Materials, 2013, Vol. 379, pp. 110-114
50. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд / Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. – М.: Металлургия, 1984. – 528с.
51. Безопасность жизнедеятельности. /Под ред. Н.А. Белова - М.: Знание, 2000 - 364с.

## Приложение А

### Раздел на иностранном языке

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4АМ61	Караваев В.Е.		

Консультант школы ИШНПТ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Коростелева Е.Н.	к.т.н.		

Консультант школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Демьяненко Н.В.			

## **2 The materials and their research methods**

### **2.1. Source materials, methods of making samples and measuring their mechanical properties**

Samples for the studies were obtained by sintering compacts from mixtures of tin and aluminum powders with different silicon contents. The following powders were used to formulate the mixtures:

- High-dispersion aluminum powder ASD-4 (TU 48-5-226-87). Granulometric composition: from 20 to 30 microns - no more than 12%, from 30 to 50 microns - no more than 3%, less than 50 microns - 99.6%.
- Powder of tin of grade PO 2 (GOST 9723-73). Granulometric composition: <45 microns - not less than 80%; > 71 microns - no more than 2.2%. The content of impurities in the powder - (Fe, Pb, Cu, S, O<sub>2</sub>, Sb, Bi, As) - no more than 1%.
- Powders of the sprayed Al-alloy with different silicon content

From the initial powders, mechanical mixtures were prepared, the tin content in which was 40%, and the silicon content was 0.5%, 12%, and 23%. The structure of the data is shown in Figure 2.1. The mixing was carried out in a ball mill type mixer for 5-6 hours, then the powders were sieved through a sieve with a mesh size of 80  $\mu\text{m}$ .

Further, samples were obtained from the obtained mixtures by cold pressing on a machine MS-500 (Figure 2.2) with a diameter of 20 mm and a height of 9 mm and dimensions of 60x10x10 mm for ECAP. The porosity of the crude samples was  $\approx 10\%$ . The transverse dimensions of the samples for ECAP corresponded to the section of the channels of the mold for ECAP. Pressing was carried out in a steel mold, whose side walls were covered with a thin layer of a mixture of fuel oil and graphite to prevent scoring before filling the powder. Pressing was carried out on restraints with a calculated height

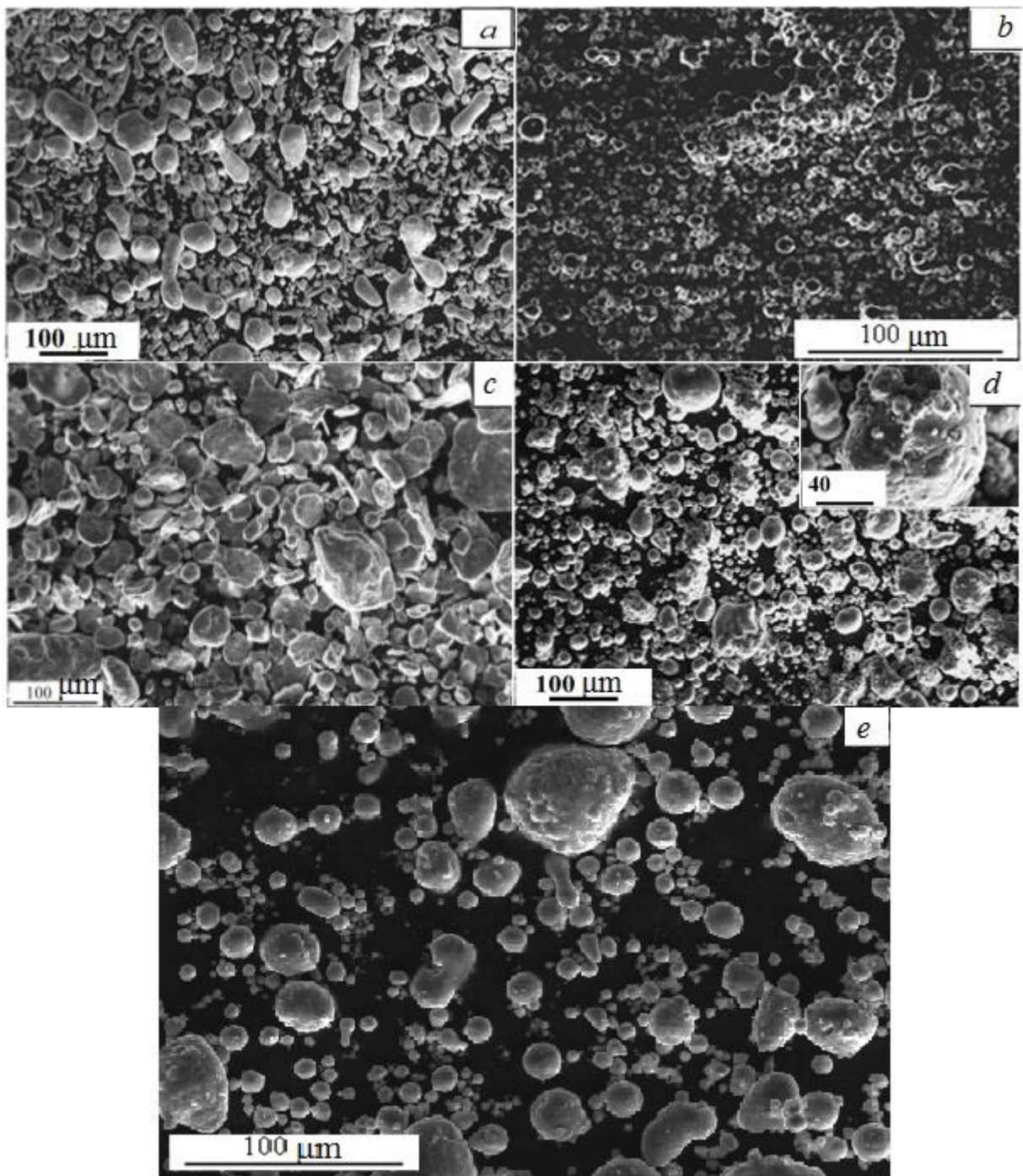


Figure 2.1 – Initial powders: Sn (PO 2) (a), Al ASD-4 (b), Al-0.5 wt% Si (c), Al-12 wt.% Si (d), Al-23 wt.% Si (e).



Figure 2.2 – Press machine MS-500

Sintering of cold-pressed samples was carried out in a vacuum of at least 10-2 Pa in an electric furnace SNVE-1.3.1 / 16 (Figure 2.3). The sintering temperature for samples Al-40Sn and (Al-0.5Si)-40Sn was 600 ° C, and the optimal time Exposure - 1 hour. In the case of the composite (Al-12Si) -40Sn and (Al-23Si) -40Sn, sintering was carried out at 570 ° C, in order to avoid reflow of the samples, with a preliminary exposure for one hour at 550 ° C.



Figure 2.3 – Electric furnace SNVE-1.3.1 / 16

The volume (V) of the test samples was determined before and after sintering from the results of measuring their linear dimensions. The mass of the samples (m) was determined by means of analytical weights with an accuracy of 0.001 g, and their density was calculated by the formula:

$$\rho_{\text{обп}} = \frac{m}{V}. \quad (2.1)$$

The porosity (P) of the raw and sintered samples was determined according to the following formula:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_{\text{обп}}}{\rho_{\text{теор}}}\right) * 100\%, \quad (2.2)$$

where  $\rho_{\text{обп}}$  – is the sample density;

$\rho_{\text{теор}}$  – theoretical density calculated for the material of the investigated composition, which does not contain pores.

The value of phear for mixtures of aluminum alloy powder and tin was calculated according to the additivity rule:

$$\rho_{\text{теор}} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\alpha_1 \rho_2 + \alpha_2 \rho_1}, \quad (2.3)$$

where  $\alpha$  – the weight concentration of the corresponding powder component (wt.%);

$\rho_i$  – is the reference density (g / cm<sup>3</sup>) of pure tin or Al-Si alloy.

In the case of samples which, due to the sweat-out tin, lost mass during sintering, their theoretical density was recalculated taking into account the mass loss. The results of calculations are given in Table 2.1.

Table 2.1 – Theoretical density (g / cm<sup>3</sup>) used to calculate the porosity of raw and sintered composites (Al-Si)-Sn

Состав алюминиевой матрицы	Концентрация Sn, вес. %.	
	0	40
Al	2.71	3.61
(Al-0.5Si)	2.7	3.61
(Al-12Si)	2.65	3.54
(Al-23Si)	2.6	3.1



The strength of the antifriction composite materials (Al-Si) -Sn was determined by their compression test (GOST 25.503-97) using the universal testing machine Walter + Bai AG LFM-125 (Figure 2.4). The loading rate of the samples was 0.5 mm / min. Samples of a prismatic shape were cut from the middle part of the sintered blanks and measured 5x5x10 mm. To prevent the effect of friction on the end parts of the samples, graphite powder was applied. At least three tests were carried out for each point.



Figure 2.4 – The universal testing machine Walter + Bai AG LFM-125

The change in the area of the samples during the precipitation was taken into account according to the following formula:

$$S = \frac{S_0}{(1-\delta)} , \quad (2.4)$$

where  $S_0$  – initial sample area;

$\delta$  – linear deformation.

The strength of the materials after the ECAP was determined by compressing the samples along the axis, the direction of which coincided with the longitudinal axis of the pressed billet.

Hot compacting (HD) was carried out in the initial mold at a temperature of 200 ° C. The pressing force was 10 tons.

For the intensive plastic deformation of sintered composites (Al-Si) -Sn, the method of equal-channel angular pressing (ECAP) has been chosen, since it allows samples to be subjected to considerable deformations without changing their transverse dimensions, and also to control the shape of the structural constituents of the composite by selecting the pressing route [41 , 44].

For pressing, we used a mold of 40X steel with a hardness of ~ 50 HRc, with a specially designed design that allows multiple pressing of samples without taking out samples (Figure 2.5) [45].

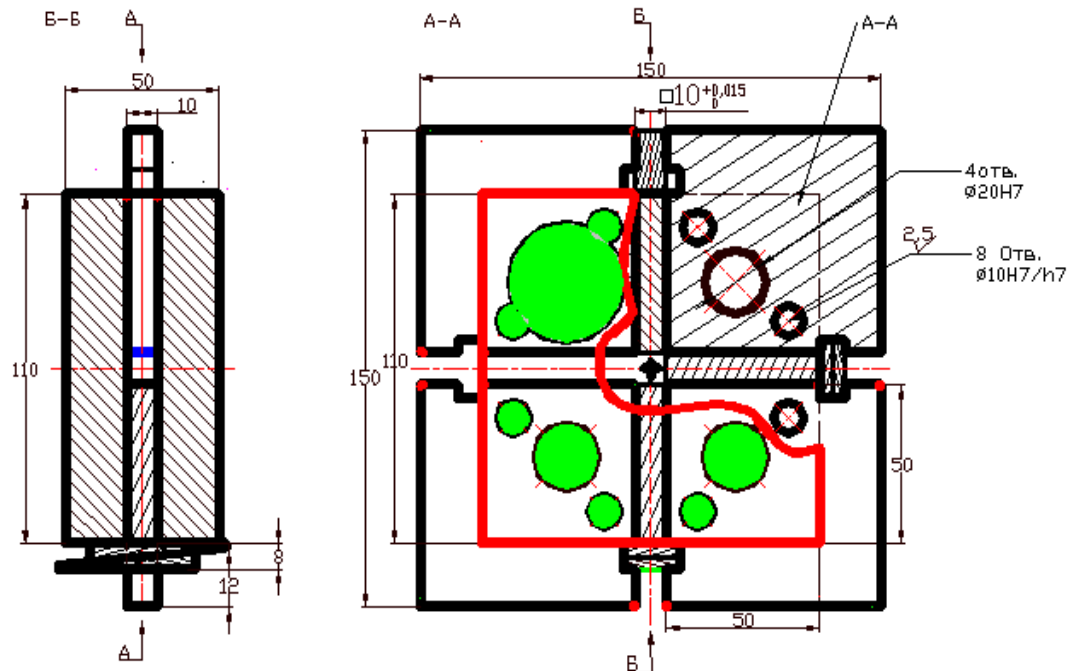


Figure 2.5 – Diagram of the mold for the ECAP

To reduce friction, the walls of the channels of the mold were covered with a thin layer of lubricant consisting of a mixture of fuel oil and graphite. The mold with the samples placed in it was heated before pressing in the electric furnace SNOL

(Figure 2.6). The exposure was 15 minutes at a heating temperature of 200 ° C.



Figure 2.6 – The electric furnace SNOL

## 2.2. Investigation of the structure of composites (Al-Si)-Sn

Metallographic studies of the structure of sintered and deformed materials were carried out on the optical microscope AXIOVERT-200MAT (Zeiss, Germany). Figure 2.7.

Since the resolving power of optical microscopes (OM) does not exceed 0.2  $\mu\text{m}$ , raster electronic microscopy (REM) was also used for a more detailed study of the structure of sintered and deformed composites (Al-Si)-Sn [25]. For the REM study was used on a LEO EVO 50 microscope (Karl Zeiss, Germany), whose resolution is 30 nm (Figure 2.8). The microscope is additionally equipped with a built-in microanalyzer, with the help of which the elemental composition of the samples was determined



Figure 2.7 – The optical microscope AXIOVERT-200MAT



Figure 2.8 – LEO EVO 50 microscope

Grids for metallographic studies of samples were prepared by grinding the cutting surface on sandpaper with decreasing granularity of the abrasive, and then on the felt with the diamond paste applied on it. Grinding was carried out on a polishing machine MECAPOL P 230 (Figure 2.9). The grinded surface was chemically etched in a 4% solution of nitric acid HNO<sub>3</sub> in alcohol.



Figure 2.9 – Polishing machine MECAPOL P 230

### **2.3. Tribological tests of composites (Al-Si)-Sn**

The most fully antifrictional properties of the materials are manifested in the absence of liquid lubricant at the contact, therefore, the tests of sintered and deformed composites (Al-Si) -Sn were carried out under dry friction conditions for steel in the "finger-disk" scheme on a tribotester of the firm «Tribotechnic» (France)(Figure2.10).

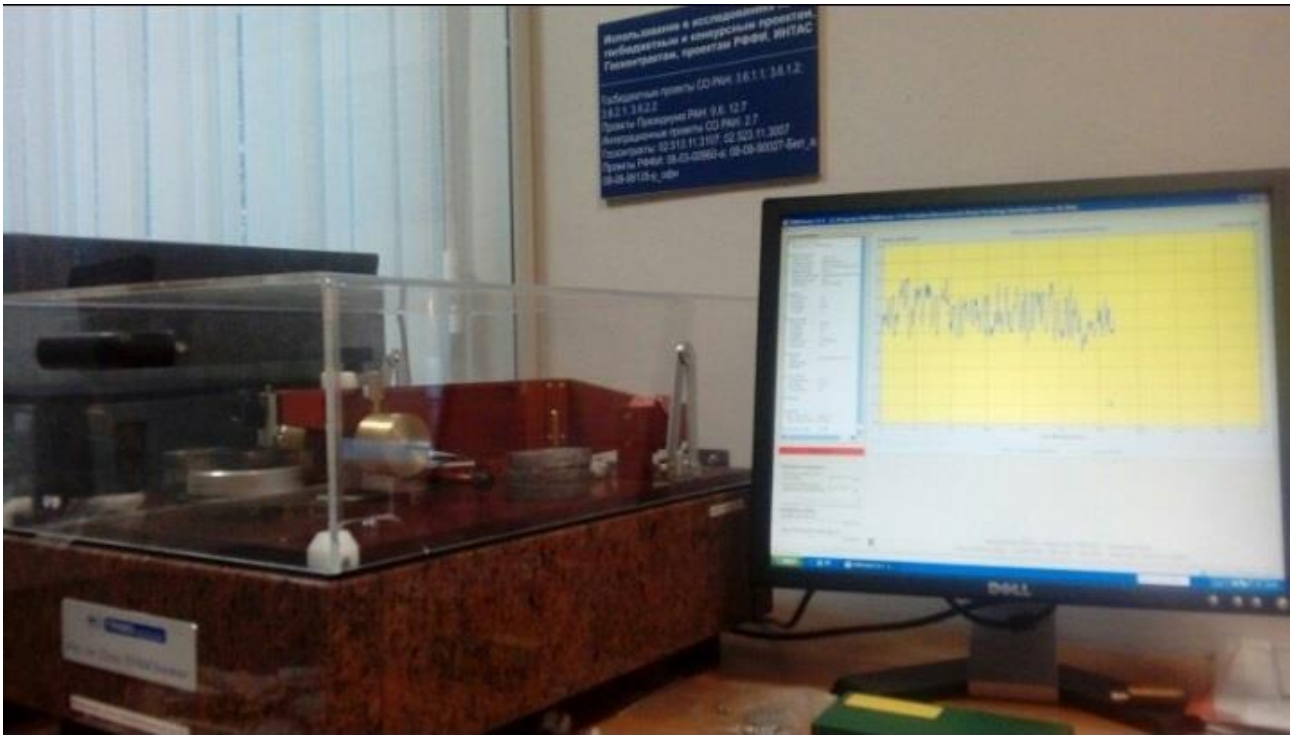


Figure 2.10 – Tribotester of the firm «Tribotechnic»

The test pieces were rectangular parallelepipeds with a working surface area of 9 mm<sup>2</sup>. As a counterbody, discs 80 mm in diameter made of hardened steel were used. 45 with a hardness of 45-47 HRC. The working surface of the samples was grinded according to the scheme used to prepare the sections for metallographic studies. The working surface of the disc was polished on a felt cloth using a diamond paste with particle sizes of 1-3 μm. To eliminate contamination, the working surfaces of the sample and disc were wiped with a cotton swab dipped in acetone before testing.

The load on the friction surface of the samples was 1, 3 and 5 MPa, and the slip velocity was 0.6 m / s. The value of the frictional force was registered automatically every second by the built-in microprocessor. For the samples deformed by the ECAP method, the friction surface was the material flow plane, and the direction of friction was chosen across elongated tin inclusions. The length of the lapping path for all samples was 1000 m. The wear rate of the materials studied was determined by the formula:

$$I_h = \frac{\Delta l}{L}, \quad (2.7)$$

where  $\Delta l$  – relative shortening of the sample in μm;

L – The friction path, which for all the tests was 500 m.

Investigation of the structure and composition of the friction surface of the samples and the steel counterbody was carried out using the methods of OM and REM.

The main volume of structural research was carried out on the equipment of the Center for collective use of the Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences