

На правах рукописи

Подрабинник Павел Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ
ТРЕНИЯ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И
ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Специальность 2.5.3 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

- Научный руководитель:** **Гершман Иосиф Сергеевич,**
доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»).
- Официальные оппоненты:** **Асланян Ирина Рудиковна,**
доктор технических наук, профессор кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет»
- Бурлакова Виктория Эдуардовна,**
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»;
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ).

Защита диссертации состоится «27» декабря 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 при ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, Ростовской обл., пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.01,
доктор технических наук, профессор

П. Н. Щербак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Мировые затраты на преодоление сил трения и реновацию изношенных в результате этого процесса изделий приходится в среднем около 23 % всей вырабатываемой энергии, что в контексте каждой конкретной страны составляет существенную часть ее валового национального продукта. С другой стороны, увеличение производительности машин в промышленности напрямую связано в том числе с повышением мощности применяемых двигателей, ведущим к ужесточению условий трения агрегатов. Лимитирующим фактором являются антифрикционные свойства узлов трения, в связи с чем их совершенствование является перманентной задачей производителей и потребителей.

Диверсификация материалов для подшипников скольжения с целью обеспечения лучших трибологических характеристик для конкретных типов пар трения является естественным процессом развития техники. Тем не менее существующие требования к материалам подшипников скольжения являются компромиссом между трибологическими и механическими требованиями. Распространенные бронзовые монометаллические подшипники отличаются тем, что в процессе задира при масляном голодании часто приводят к разрушению стального контртела по механизму эффекта Ребиндера. Данная проблема может быть решена путем изготовления монометаллических подшипников на основе сплавов алюминия, который не приводит при задира к разрушению стального контртела. К тому же алюминий в 4,6 раза дешевле меди и в 2,7 раза легче.

Большинство существующих марок алюминиевых антифрикционных сплавов неприменимы для монометаллических исполнений, ввиду чего разрабатываются новые марки. Основой применяемого подхода к созданию новых трибологических сплавов остается теория, согласно которой благоприятное трение возможно при активном вовлечении легкоплавких мягких материалов. Такая концепция ведет к снижению несущей способности сплава и нарушению баланса свойств, следовательно, ее возможности практически исчерпаны.

В последнее время все больше внимания уделяется трибохимии, так как при трении отмечается образование вторичных структур на трущихся поверхностях. Вторичные структуры оказывают благоприятное влияние на процесс трения и являются результатом превращений, происходящих на поверхностях трения. Комплекс таких изменений, включающий в себя физико-химические процессы, является частью самоорганизации при трении, где ключевую роль играют принципы неравновесной термодинамики. Изучение вторичных структур на поверхности трения имеет большое значение для правильного понимания особенностей и закономерностей их формирования. В данном исследовании выработаны рекомендации для изготовления антифрикционных сплавов на основе алюминия с улучшенным комплексом свойств, способных к самоорганизации в процессе трения, что делает тему работы актуальной.

Результаты диссертации были получены в рамках реализации следующих научно-исследовательских работ:

– проект ФЦП 2017-14-576-0053 «Разработка высокоэффективных антифрикционных алюминиевых сплавов, технологии их изготовления и монометал-

лических подшипников скольжения из них, работающих в условиях жидкостного и граничного трения» (2017-2019);

– грант РФФИ № 14-19-01033 «Влияние фазового состава многокомпонентных алюминиевых сплавов на физико-механические и трибологические характеристики поверхностных наноразмерных вторичных структур» (2014-2017).

Степень разработанности темы исследования. При работе над диссертацией были изучены коллективные труды и отдельные монографии ученых, посвященные исследованию трения и вызванных им процессов на микроуровне. Основы для данного исследования были заложены И.В. Крагельским, сформулировавшим молекулярно-механическую теорию трения и развившим ее в концепцию «третьего тела», составной частью которого являются вторичные структуры. Данное направление впоследствии было продолжено А.С. Кужаровым и С.А. Поляковым. В качестве теоретического обоснования использовалась теория самоорганизации бельгийского ученого И. Пригожина, описавшего термодинамические аспекты ее протекания. Эти идеи легли в основу работ Б.И. Костецкого, Л.И. Бершадского, Б. Кламецки, которые указывали на формирование вторичных структур при трении вследствие самоорганизации. Практическая реализация принципов самоорганизации при трении была предпринята в работах Н.А. Буше и И.С. Гершмана, А.Е. Миронова, результатом которых стало понятие о совместимости трущихся поверхностей и описание процессов с точки зрения неравновесной термодинамики.

В работе также используются и развиваются наработки и идеи российских ученых Н.А. Буше, И.Я. Буяновского, И.Г. Горячевой, В.В. Измайлова, И.И. Курбаткина, В.И. Колесникова, Ю.К. Машкова, Н.М. Русина, М.М. Хрущова, А.В. Чичинадзе.

За рубежом внимание к проблемам формирования поверхности трения уделяется в работах К. Кравчика, Б. Кламецки, К. Накаямы, М. Носоновского, Дж. Пратта, А. Сугибучи, М. Хонсари, Г. Фукса-Рабиновича, Дж. Фьюри и других.

Целью настоящей работы является исследование вторичных структур и закономерностей их образования на поверхностях трения комплексно легированных антифрикционных алюминиевых сплавов для уточнения составов этих сплавов, способствующих снижению износа в процессе трения.

В диссертации поставлены следующие исследовательские **задачи**:

1. Проанализировать и определить теоретические основы снижения износа трущихся тел в процессе трения за счет образования вторичных структур.
2. Обосновать номенклатуру легирующих компонентов для экспериментальных антифрикционных сплавов на основе алюминия и их концентрацию.
3. Исследовать влияние легирующих компонентов на микроструктуру и трибологические свойства экспериментальных антифрикционных сплавов на основе алюминия.
4. Исследовать вторичные структуры, образованные на поверхности трения экспериментальных алюминиевых сплавов после трибологических испытаний.
5. Разработать на основе полученных данных алюминиевые сплавы с улучшенными трибологическими характеристиками за счет формирования необходимых вторичных структур.
6. Установить закономерности образования вторичных структур и их влияние на трибологические свойства экспериментальных антифрикционных сплавов.

Объектом исследования являются антифрикционные алюминиевые монометаллические подшипники скольжения, работающие в условиях трения со смазкой. **Предметом исследования** являются вторичные структуры, образующиеся на поверхности трения антифрикционных материалов

Теоретические и методологические основы исследования. Теоретическую базу исследования составляет теория самоорганизации и неравновесная термодинамика применительно к трению. Экспериментальная часть работы выполнялась в условиях, приближенных к эксплуатационным (кинематическая схема валкоподка, стендовые испытания). Исследования выполнялись с использованием стандартных методик с применением калиброванных приборов.

Научная новизна работы:

1. Впервые применена методика разработки антифрикционных алюминиевых сплавов на основе исследования вторичных структур, образованных на поверхности трения.

2. Установлено, что в диссипации энергии, сообщаемой телу при трении, значительную роль играют трибохимические реакции и фазовые переходы при формировании вторичных структур.

3. Впервые выявлен эффект перераспределения и выделения магния и цинка из твердого раствора на основе алюминия при трении, что является самопроизвольным процессом, сопровождающимся снижением износа за счет уменьшения производства энтропии в системе.

4. Экспериментально на примере образования сульфида свинца показана возможность усиления химической активности материалов при трении, инициирующей протекание реакций в условиях, отличных от равновесных.

5. Установлено влияние легирующих компонентов на трибологические свойства многокомпонентных алюминиевых сплавов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность экспериментальных данных по трибологическим свойствам многокомпонентных алюминиевых сплавов.

2. Влияние образующихся в процессе трения вторичных структур на поверхности сложнолегированных алюминиевых сплавов на трибологические свойства.

3. Закономерности образования вторичных структур на поверхности трения сложнолегированных алюминиевых сплавов в условиях граничного трения со сталью.

4. Установление эффекта улучшения трибологических свойств многокомпонентного алюминиевого сплава в процессе граничного трения со сталью за счет протекания в неравновесных условиях самопроизвольных трибохимических изменений.

Достоверность результатов обеспечена применением комплекса взаимодополняющих методик, адекватных целям и задачам исследования, привлечением обширного экспериментального материала с его количественным и качественным анализом, а также корректным применением методик экспериментальных исследований и современных методов статистической обработки полученных данных.

Для проверки выдвинутых положений в работе проведено самостоятельное экспериментальное исследование, основу которого составили результаты исследования (графики, фотографии и таблицы с результатами) экспериментальных об-

разцов многокомпонентных алюминиевых сплавов. По полученным эмпирическим данным были сделаны оригинальные выводы.

Практическая и теоретическая значимость работы:

1. Совокупностью теоретических и экспериментальных результатов обоснована возможность замены применяемых при изготовлении монометаллических подшипников скольжения бронз более дешевыми многокомпонентными алюминиевыми сплавами с повышенными трибологическими свойствами.

2. Экспериментально обосновано и доказано повышение задиростойкости пары трения и снижение интенсивности изнашивания многокомпонентного алюминиевого сплава и уменьшения износа стального контртела за счет образования вторичных структур и протекания, в том числе, несамопроизвольных трибохимических реакций.

3. Материалы, методы и обобщения, содержащиеся в работе, могут быть использованы для создания новых антифрикционных сплавов, а также стать основой для совершенствования методики исследования трибологических характеристик материалов.

4. На основе исследования вторичных структур разработаны новые антифрикционные алюминиевые сплавы с пониженным содержанием олова для монометаллических подшипников скольжения.

5. Изготовлены опытные монометаллические подшипники скольжения из сплава на основе АО-5,8 для стендовых испытаний в составе серийного турбокомпрессора ТК33Н-02 на базе ОАО «СКБТ» (г. Пенза). В результате успешных испытаний подшипники были рекомендованы для проведения ресурсных испытаний.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018» (2018 год, г. Севастополь); XII Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению 2018» (2018 год, г. Москва); XIII Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению 2020» (2020 год, г. Москва), X Международная конференция БАЛТТРИБ 2019 (BALTTTRIB 2019, 2019 год, г. Каунас, Литва), IV междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (2018 год, г. Москва), Международная конференция «Машиностроение: традиции и инновации» (МТИ-2019 и МТИ-2017, г. Москва).

Публикации. По теме исследования автором опубликовано 16 статей, из них 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК, 9 – в изданиях, включенных в базы данных цитирования Scopus и Web of Science, 4 публикации в других научных изданиях, а также 3 патента РФ на изобретения.

Объем и структура диссертации. Текст диссертации состоит из введения, шести глав, заключения. Всего 201 страница машинописного текста, включая библиографический список из 151 наименования, 37 таблиц, 65 рисунков, 17 формул, 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведены результаты обзора научно-технической литературы, касающейся процесса трения в узле «подшипник скольжения – вал». Рассмотрены существующие условия трения и типы подшипников. Последние, как правило, классифицируются по количеству слоев. С технологической точки зрения изготовление монометаллических подшипников предпочтительнее ввиду меньшей трудоемкости, однако, у би- и триметаллических исполнений лучше трибологические свойства. Получение монометаллических подшипников скольжения (МПС) с повышенными эксплуатационными свойствами является нетривиальной задачей, так как требует сочетания в материале подшипника ряда взаимоисключающих механических и трибологических свойств.

Рассмотрены существующие антифрикционные материалы на основе металлов, такие как баббиты, бронзы, латуни, алюминиевые сплавы. Показано, что применение сплавов на основе алюминия вместо бронз для изготовления монометаллических подшипников скольжения является перспективным направлением, благодаря лучшим трибологическим свойствам, меньшей стоимости материалов и их обработки. Однако механические характеристики существующих алюминиевых сплавов не позволяют применять их для изготовления МПС в двигателях внутреннего сгорания. Применяемые для МПС алюминиевые сплавы уступают бронзам и латуням по механическим свойствам и несущей способности.

На основе данных в открытых источниках были проанализированы различные системы сплавов, оценено возможное влияние отдельных легирующих элементов и их концентрации на свойства материалов. Общим признаком антифрикционности в большинстве работ является присутствие мягкой фазы – олова и/или свинца – в микроструктуре материала, которые, распределяясь по поверхности, реализуют эффект «твердой смазки».

Важной особенностью при трении является формирование на поверхности трения вторичных структур – совокупность прошедших изменений различной природы в материале на трущейся поверхности. С термодинамической точки зрения, основным процессом при трении является преобразование и рассеяние энергии. В работах Л.И. Бершадского и В.Е. Клатески были использованы концепции неравновесной термодинамики и самоорганизации для описания процессов при трении. Самоорганизация при трении – это процесс формирования диссипативных структур, рассеивающих сообщаемую телу энергию. Данное явление возможно только, если материал находится в неравновесном состоянии. При инициации самоорганизации могут протекать несамопроизвольные процессы, в том числе трибохимические, направленные на снижение износа материала за счет увеличения отрицательного производства энтропии. В данном контексте вторичные структуры могут рассматриваться как результат протекания диссипации энергии, а их исследование является важным для выявления процессов, позволяющих снижать износ при трении. Из приведенных в обзоре данных также следует, что репрезентативными могут считаться только эксперименты, наиболее приближенные к реальным условиям эксплуатации узла трения «подшипник скольжения – вал».

В результате проведенного анализа литературы была обоснована цель работы, поставлены задачи, выбраны методы исследования и определена система алюминиевого сплава для изготовления.

Во второй главе приведено описание методов и материалов, применяемых в работе. Также представлены данные по предварительно проведенным испытаниям механических свойств полученных алюминиевых сплавов в сравнении с выбранной референсной бронзой БрО4Ц4С17. Согласно полученным результатам все сплавы продемонстрировали свойства на уровне бронзы либо превосходили ее.

Для исследования на первом этапе были применены четыре экспериментальных алюминиевых сплава системы Al-Sn-Pb-Cu-Zn-Mg-Si-Ti, полученные методом литья с последующей термообработкой (таблица 1). Легирование оловом от сплава к сплаву постепенно снижалось. Содержание цинка и магния также варьировалось, но не превышало предел растворимости в алюминии. Концентрация основных компонентов и примесей в объеме сплавов определялось с помощью оптического эмиссионного спектрометра «Spectrolab – S» (Австрия). Механические свойства сплавов представлены в таблице 2.

Трибологические испытания проводились по кинематической схеме вал-колодка на машине трения СМЦ-2 для моделирования наиболее приближенных условий трения в реальном узле «подшипник-вал» (рисунок 1).

Таблица 1. Состав экспериментальных алюминиевых сплавов первой серии

№ п/п	Марка сплава	Содержание элементов, % масс.								Примеси, % масс.
		Sn	Pb	Cu	Zn	Mg	Si	Al	Ti	Fe
1	АО-11	11,0	2,6	3,9	2,6	0,0	0,1	ост.	0,04	0,2
2	АО-9,8	9,8	2,5	4,5	2,4	1,2	0,6	ост.	0,03	0,3
3	АО-9,6	9,6	3,2	4,9	4,4	0,3	0,1	ост.	0,02	0,3
4	АО-8,7	8,7	3,2	3,4	2,9	0,4	0,5	ост.	0,03	0,1

Таблица 2. Механические свойства экспериментальных сплавов

№ п/п	Сплав	Сопротивление при растяжении, σ_b , МПа	Твердость, НВ	Отн. удлинение, %	Ударная вязкость КСU, кДж/м ²
1	АО-11	173	59	2,9	121
2	АО-9,8	163	74	0,3	21
3	АО-9,6	185	63	3,8	50
4	АО-8,7	168	60	5,5	83
5	БрО4Ц4С17	148	65	8,8	40

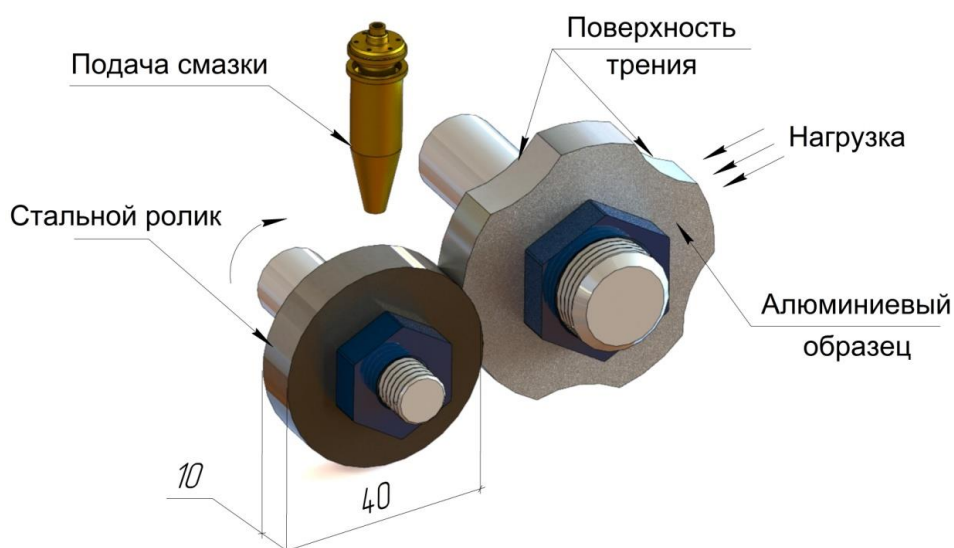


Рисунок 1. Кинематическая схема проведения трибологических испытаний

В качестве смазки использовалось масло M14B2, которое подавалось капельным способом для реализации граничного трения. Данный вид трения был выбран для интенсификации трения и повышения вероятности выхода материала из равновесного состояния, а, следовательно, и образования вторичных структур. Проводились испытания на прирабатываемость, задиростойкость и интенсивность изнашивания. При проведении испытаний на интенсивность изнашивания образцы сначала проходили приработку в течение 30 минут при нагрузке 304 Н, затем очищались, взвешивались и снова устанавливались в машину трения на 40 часов при постоянной скорости вращения 500 об/мин, нагрузка 1500 Н. Для каждого материала проводилось не менее трех испытаний для проведения статистической обработки результатов.

Исследование исходной микроструктуры, поверхности трения и подповерхностного слоя образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3, оснащенный модулем для энергодисперсионного анализа (ЭДС) X-Act. Полученные образцы алюминиевых сплавов исследовались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре Thermo Scientific K-alfa для подтверждения состава и установления образованных связей. Исследование фазового состава проводилось методом рентгенодифракционного анализа (РФА) на дифрактометре Bruker D8 Advance с применением монохроматического излучения $\text{Cu K}\alpha$ по схеме Брэгга-Брентано. После трибологических испытаний все образцы промывались от остатков смазки водой и тетрахлорметаном, а перед непосредственным исследованием дополнительно проходили очистку в ультразвуковой ванне с химически чистым ацетоном. Методом инфракрасной спектроскопии на спектрометре Vertex 70 было исследовано масло M14B2 и определены элементы присадок.

Кроме химического анализа поверхности трения контролировалась также шероховатость профилографом-профилометром Hommelwerke T8000 (Hommelwerke GmbH, Швеннинген, Германия).

В третьей главе представлены результаты трибологических испытаний образцов АО-11, АО-9,8, АО-9,6, АО-8,7. Все образцы оказались лучше бронзы БрО4Ц4С17 по прирабатываемости, задиростойкости и показателям износа стального контртела. По коэффициенту трения и линейному износу бронзу превзошел только сплав АО-9,8. Для оценки влияния элементов сплава на формирование вторичных структур были исследованы методом СЭМ и ЭДС поверхности трения до и после трибологических испытаний. В отличие от других материалов сплав АО-9,8 имел на поверхности трения наибольшее содержание олова: 4,7 % масс. до трения и 3,2 % масс. после испытаний. Также на поверхности трения наблюдается повышение содержания цинка и магния. В частности, в сплаве АО-9,8 концентрация цинка увеличилась в 6 раз с 0,3 % до 1,8 %, а магния – в 3 раза с 0,2 % до 0,6 %.

На основе полученных результатов испытаний трибологических свойств сплавов АО-11, АО-9,8, АО-9,6 и АО-8,7 и элементного состава их вторичных структур на поверхности трения было выплавлено еще 4 сплава той же системы (таблицы 3 и 4). В данных сплавах была еще снижена концентрация олова, уменьшено содержание цинка и увеличено легирование магнием. Механические свойства алюминиевых сплавов второй серии плавок также не допустили значительно ухудшения свойств по сравнению с бронзой БрО4Ц4С17.

Таблица 3. Состав алюминиевых сплавов второй серии

№ п/п	Марка сплава	Содержание элементов, % масс.								Примеси, % масс.
		Sn	Pb	Cu	Zn	Mg	Si	Al	Ti	Fe
1	АО-7,6	7,6	3,3	4,0	0,5	0,07	1,0	ост.	0,05	0,1
2	АО-6,4	6,4	3,0	4,1	1,9	1,4	0,9	ост.	0,03	0,2
3	АО-5,8	5,8	2,7	4,1	2,3	1,5	1,5	ост.	0,04	0,1
4	АО-5,4	5,4	2,6	3,5	2,3	1,7	0,8	ост.	0,04	0,1

Таблица 4. Механические свойства алюминиевых сплавов второй серии

№ п/п	Марка сплава	Механические свойства			
		Временное сопротивление при растяжении, σ_b , МПа	Твердость, НВ	Отн. удлинение, %	Ударная вязкость КСУ, кДж/м ²
1	АО-7,6	159	50	4,0	45
2	АО-6,4	139	55	2,3	35
3	АО-5,8	140	55	1,9	24
4	АО-5,4	144	53	2,9	32

В четвертой главе представлены результаты трибологических свойств алюминиевых сплавов второй серии плавок. Полученные сплавы также показали высокие значения задиростойкости и приработки. Три сплава из четырех второй серии плавок превзошли три сплава кроме АО-9,8 первой серии по износостойкости. Сводные данные по трибологическим свойствам всех сплавов приведены в таблице 5. Для ряда образцов при испытаниях фиксировались нехарактерные для них скачки уменьшения момента трения при увеличении нагрузки, свидетельствующие о возможном протекании изменений на поверхности трения (рисунок 2).

Таблица 5. Трибологические свойства алюминиевых сплавов

№ п/п	Марка сплава	Трибологические свойства					
		Задиростойкость, Н	Прирабатываемость, мм ²	Износ материала, мг	Износ стали, мг	Кoeff. трения	Температура образца t, °С
1	БрО4Ц4С17	1081	39,2	2,7	4,0	0,016	38
Среднеоловянистые сплавы							
2	АО-11	1650	49,8	1,2	0,6	0,020	33
3	АО-9,8	2832	57,8	0,7	0,7	0,015	31
4	АО-9,6	2107	42,8	2,0	2,1	0,019	37
5	АО-8,7	2407	50,0	2,4	0,8	0,022	32
Низкооловянистые сплавы							
6	АО-7,6	1823	46,8	0,5	0,8	0,026	42
7	АО-6,4	2767	53,0	0,9	1,0	0,014	38
8	АО-5,8	2330	39,7	0,4	0,6	0,018	40
9	АО-5,4	2845	49,7	0,5	0,7	0,017	36

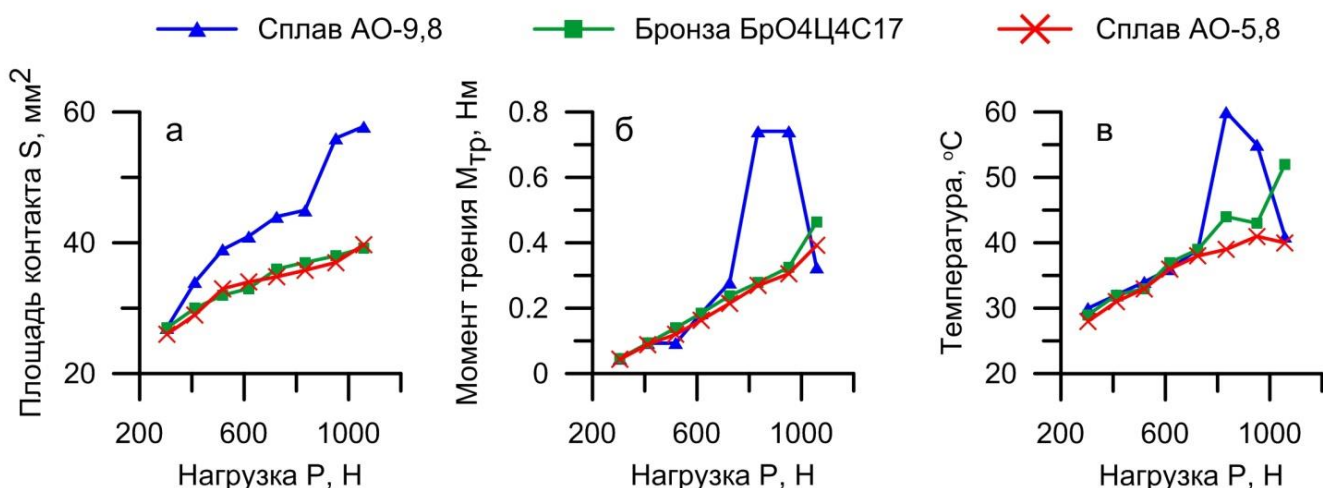


Рисунок 2. Зависимость изменения площади контакта (а), момента трения (б) и температуры образца (в) сплава АО-9,8, АО-5,8 и бронзы БрО4Ц4С17 от нагрузки приработки

По полученным данным было оценено влияние легирующих элементов сплава на трибологические свойства. Значения износа, в целом, коррелируют с содержанием мягких структурных составляющих (МСС), указывая на основной механизм изнашивания – расхождение олова и свинца, составляющих мягкие включения. Медь и кремний, образующие твердые включения, обладают большей твердостью в сравнении с другими компонентами сплава, вследствие чего увеличение их содержания в составе сплава повышает износостойкость и создает маслоудерживающий рельеф. С увеличением содержания магния в составе сплавов также имеется тенденция к снижению износа. Таким образом, показано, что содержание основных легирующих элементов (олово, свинец) оказывает влияние на трибологические характеристики до определенного предела, а также вносят основной вклад в массовый износ материала. В многокомпонентных алюминиевых сплавах на трибологические свойства оказывает влияние не только содержание мягких структурных составляющих, но и синергетическое действие легирующих элементов.

На основе полученных результатов были изготовлены опытные монометаллические подшипники скольжения из сплава АО6С3М4ЦТ для стендовых испытаний в составе серийного турбокомпрессора ТК33Н-02. В результате успешных испытаний подшипники были рекомендованы для дальнейших ресурсных испытаний.

Пятая глава посвящена исследованию исходной микроструктуры экспериментальных алюминиевых сплавов. Из восьми исследованных материалов были выбраны два образца, показавшие худшие и лучшие результаты в ходе трибологических испытаний. За критерий были взяты износ материала образца и износ стального контртела. По совокупности показателей сплав АО-8,7 был выбран в качестве худшего, а сплав АО-5,8 – лучшего.

Выбранные сплавы имеют один набор легирующих компонентов, вследствие чего их микроструктуры существенных качественных отличий не имеют, но отличаются по количественному содержанию. Алюминиевые антифрикционные сплавы были получены методом литья с последующим отжигом, за счет чего находились в равновесном состоянии в соответствии с диаграммами состояний.

Процесс трения на микроуровне можно представить как трение множества отдельных локальных участков, различных по механическим свойствам и химическим составам. Таким образом, локально обеспечиваются различные условия для формирования вторичных структур, и, как следствие, их состав может существенно отличаться при переходе от одной структурной зоны к другой. В связи с этим были отдельно проанализированы все типы включений. При легировании алюминия оловом, свинцом, медью, магнием, кремнием и цинком структура литых сплавов обычно состоит из зерен твердого раствора алюминия с магнием, цинком, кремнием и медью, по границам которых располагается ограниченная сетка включений на основе меди (CuAl_2) и кремния (рисунок 3). Мягкие структурные составляющие различного размера, располагающиеся в пространстве между зёрнами алюминия, имеют разнообразный состав, как на качественном (наличие или отсутствие магния), так и на количественном (различное соотношение олова и свинца) уровне. Цинк и магний распределены в сплаве равномерно, отдельных включений и зон повышенной концентрации не образуют.

В шестой главе представлены результаты исследования поверхности трения и подповерхностного слоя сплавов АО-5,8 и АО-8,7 методами СЭМ, ЭДС, РФЭС, РФА. Проанализировано влияние легирующих элементов на состав образующихся вторичных структур и трибологические свойства сплавов.

Поверхность сплава АО-5,8 подверглась значительным изменениям в результате трения. Отмечается значительное количество олова и свинца, распределенных по поверхности, что свидетельствует о реализации механизма «твердой смазки». Изменения структуры поверхности трения сопровождаются также изменениями в элементном составе (таблица 6). Отмечается количественное увеличение олова и свинца вследствие большей занимаемой площади по сравнению с исходным состоянием. Из-за блокирования пленкой МСС сигналов нижележащих структур наблюдается снижение содержания алюминия, меди, кремния, цинка. Несмотря на многоступенчатую очистку образцов, на поверхности значительно увеличилось количество углерода и кислорода вследствие полимеризации смазки и окисления. В сплаве АО-5,8 в два раза увеличилось содержания магния на поверхности.

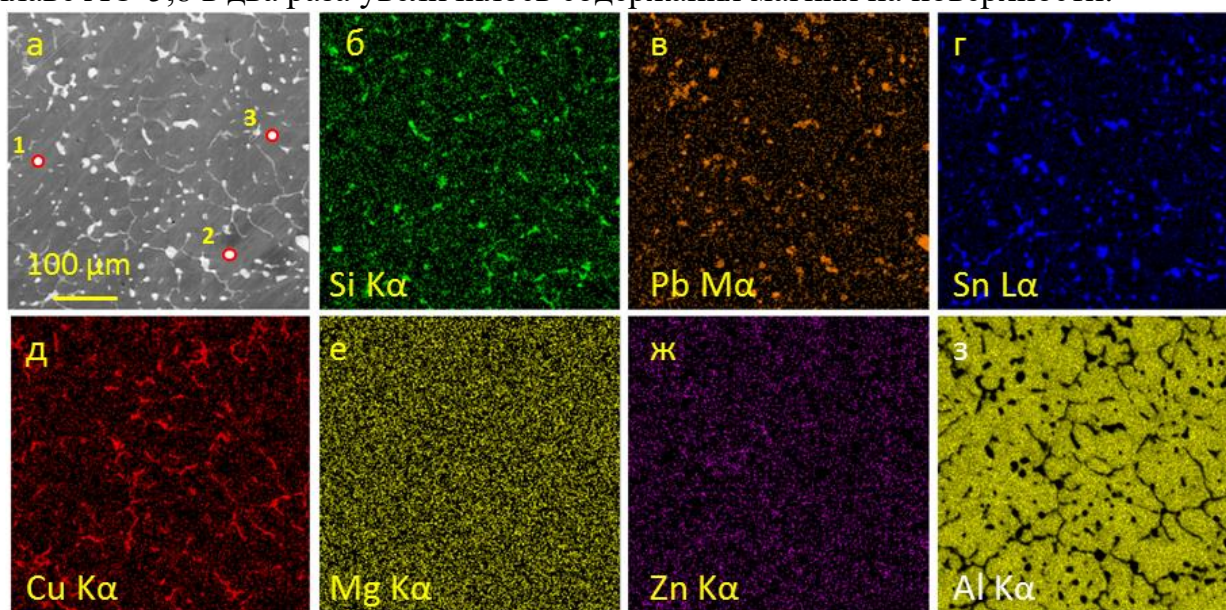


Рисунок 3. Характерная микроструктура экспериментальных алюминиевых сплавов

Таблица 6. Элементный состав поверхности трения сплава АО-5,8 при увеличении $\times 500$ крат, полученный методом ЭДС

№ п/п	Объект исследования	Элементный состав, % масс.											
		Al	Sn	Pb	Cu	Si	Zn	Mg	C	O	Fe	S	Ca
1	Поверхность до трения	77,7	3,7	2,1	2,9	1,8	2,2	0,3	5,1	3,9	-	-	-
2	Поверхность после трения	39,5	3,9	4,7	2,0	0,4	1,5	0,6	31,3	15,5	0,2	0,3	0,1
3	Изменение содержания, %	50,8	105,4	223,8	69,0	22,2	68,2	200	611,8	397,4	-	-	-

Для выявления закономерностей образования вторичных структур на данном участке были получены карты распределения обнаруженных элементов (рисунки 4), где видно, что в ряде случаев распределение носит неслучайный характер. Карты распределения свинца и серы практически полностью совпадают. При количественном ЭДС анализе была зафиксирована пропорциональная зависимость концентрации серы от содержания свинца на данных участках. По сравнению с исходным состоянием, отчетливо видно выделение магния, который до этого находился в матрице и МСС примерно в равном количестве и зон повышенной концентрации не образовывал. Концентрация магния в таких участках достигала 13%. Все выделения магния независимо от размера одновременно обогащены углеродом и кислородом. Углерод, в свою очередь, присутствует практически на всей поверхности сплава, однако его концентрация не постоянна и отличается в локальных участках. Распределение цинка в сплаве АО-5,8 осталось равномерным.

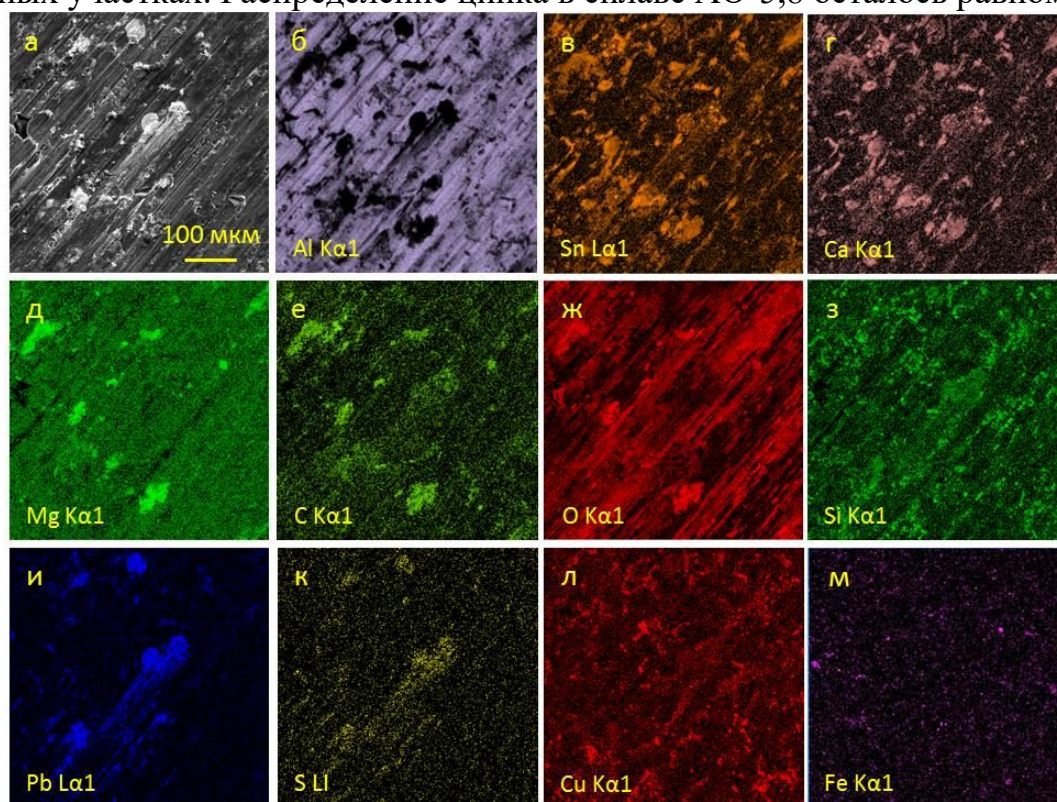


Рисунок 4. Снимок участка сплава АО-5,8 при увеличении $\times 500$ крат (а) и карты распределения элементов на данном участке (б-м)

Отличия по составу подповерхностного слоя и материала, неподверженного влиянию трения, продемонстрированы при исследовании изменения концентрации вдоль линии, перпендикулярной к поверхности трения. Содержание алюминия постепенно снижается относительно исходного своего состояния. Обеднение происходит на расстоянии 4-6 мкм от поверхности трения. Такое изменение содержания алюминия обусловлено, во-первых, его постепенным изнашиванием в ходе испытаний, во-вторых, увеличением в исследуемом объеме материала доли других компонентов сплава. Медь непосредственно на границе анализируемого участка характеризуется резким увеличением содержания. Цинк и магний имеют схожий характер изменения кривых, заключающийся в увеличении их содержания у поверхности. Углерод и кислород также обладают повышенной концентрацией у поверхности трения.

На косом шлифе образца сплава АО-5,8 благодаря МСС, являющиеся маркерами деформаций, отчетливо видна граница слоя, оказавшегося под влиянием трения (рисунок 5). Непосредственно граница перехода в глубине сплава представляет собой цепочку включений θ -фазы ввиду их большего сопротивления сдвиговым нагрузкам. Сам слой имеет толщину ~ 30 мкм, что соответствует реальной толщине 3-4 мкм. Для сплава АО-8,7 толщина деформированного слоя больше, но не превышает 5 мкм. Твердость такого деформированного слоя в среднем возрастает на 10-20 %. Матрица сплава АО-5,8 в исходном состоянии имела твердость 283 НВ, а деформированный слой – 314 НВ. Наиболее характерным свидетельством формирования тонкой полимеризовавшейся пленки вторичных структур на поверхности является насыщенный углеродом слой, расположенный равноудаленно от границы поверхности трения, повторяя ее контур.

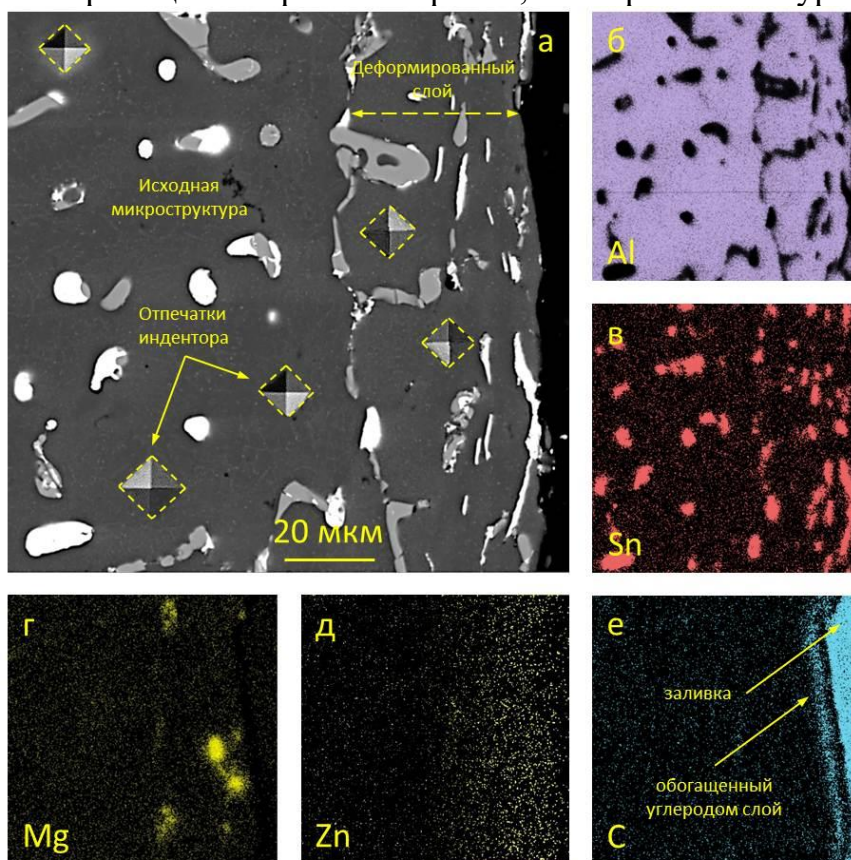


Рисунок 5. Косой шлиф сплава АО-5,8 (а) и карты распределения алюминия (б), олова (в), магния (г), цинка (д), углерода (е) на данном участке

Поверхность трения сплава АО-8,7, обладающего наиболее низкой износостойкостью, отличается от поверхности трения сплава АО-5,8. Несмотря на большее содержание олова и свинца в исходном состоянии сплава АО-8,7, после трибологических испытаний на поверхности МСС практически не обнаруживаются. В основном на поверхности преобладают твердые медные включения в алюминиевой матрице. Свинцовые и оловянные структурные составляющие представляют собой небольшие участки включений величиной до 50 мкм без какого-либо упорядоченного распределения по поверхности трения. Отсутствие пленки МСС на поверхности привело к увеличению очагов схватывания и возникновению большего числа глубоких борозд. Вместе с этим образец сплава АО-8,7 характеризуется наличием достаточно большого количества полостей, где ранее присутствовали олово и свинец. В пользу этого заключения говорит и присутствие зерен алюминиевой матрицы, имеющими правильную недеформированную форму, представляя собой исходную микроструктуру в трехмерном виде (рисунок 6). Таким образом, расход МСС в процессе трения является главной составляющей массового износа сплава АО-8,7.

Данные СЭМ и ЭДС анализа свидетельствуют о существенных отличиях в образовании вторичных структур на поверхности трения сплава АО-8,7 от сплава АО-5,8 (таблица 7).

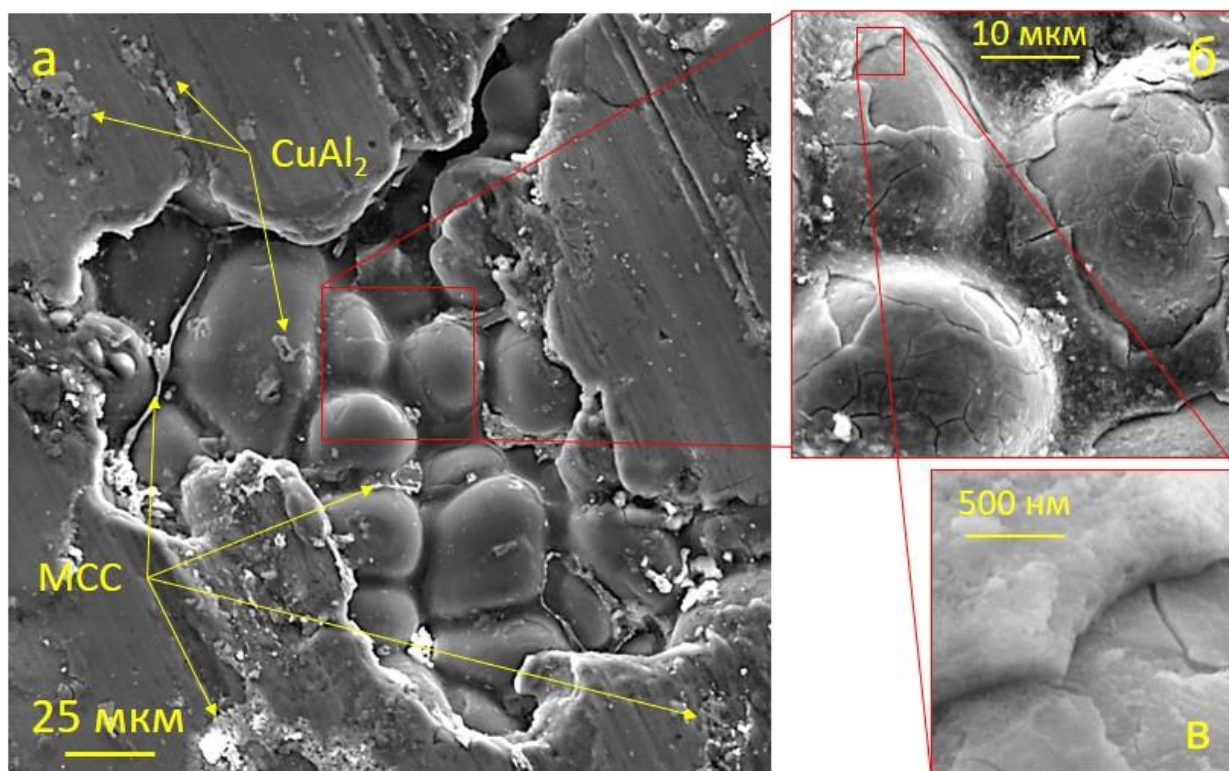


Рисунок 6. Пустота, образованная в результате трения на поверхности сплава АО-8,7

Содержание олова и свинца в сплаве АО-8,7 снизилось на 32,5 % и 72,3 % соответственно, в то время как в сплаве АО-5,8 на поверхности было обнаружено на 5 % и 123 % больше этих металлов по сравнению с исходным значением. Содержание меди в сплаве АО-8,7 после испытаний повысилось примерно на 12 %. Визуально включений θ -фазы на единицу площади больше, чем в сплаве АО-5,8, где снижение этого элемента составило 31 % против увеличения 12 % в сплаве АО-8,7. Значительно, в 8,4 раза, возросла концентрация цинка, в то время как со-

держание магния осталось неизменным. Полученные результаты подтверждаются визуально при исследовании характерного участка трения сплава АО-8,7 (рисунок 7). Распределение олова и свинца по поверхности гораздо менее выражено. Отсутствуют зоны повышенной концентрации магния, но отмечается их наличие для цинка. Концентрация цинка в таких участках достигает 9 %.

Таблица 7. Элементный состав поверхности трения сплава АО-8,7 при увеличении $\times 500$ крат, полученный методом ЭДС

№ п/п	Объект исследования	Элементный состав, % масс.											
		Al	Sn	Pb	Cu	Si	Zn	Mg	C	O	Fe	S	Ca
1	Поверхность до трения	83,4	4,0	3,3	4,0	1,0	0,5	0,1	4,7	3,53	-	-	-
2	Поверхность после трения	49,2	2,7	0,9	4,5	0,25	4,2	0,1	19,0	17,6	1,4	0	0,2
3	Изменение содержания, %	59,0	67,5	27,7	112,5	25	840	100	404,3	498,6	-	-	-

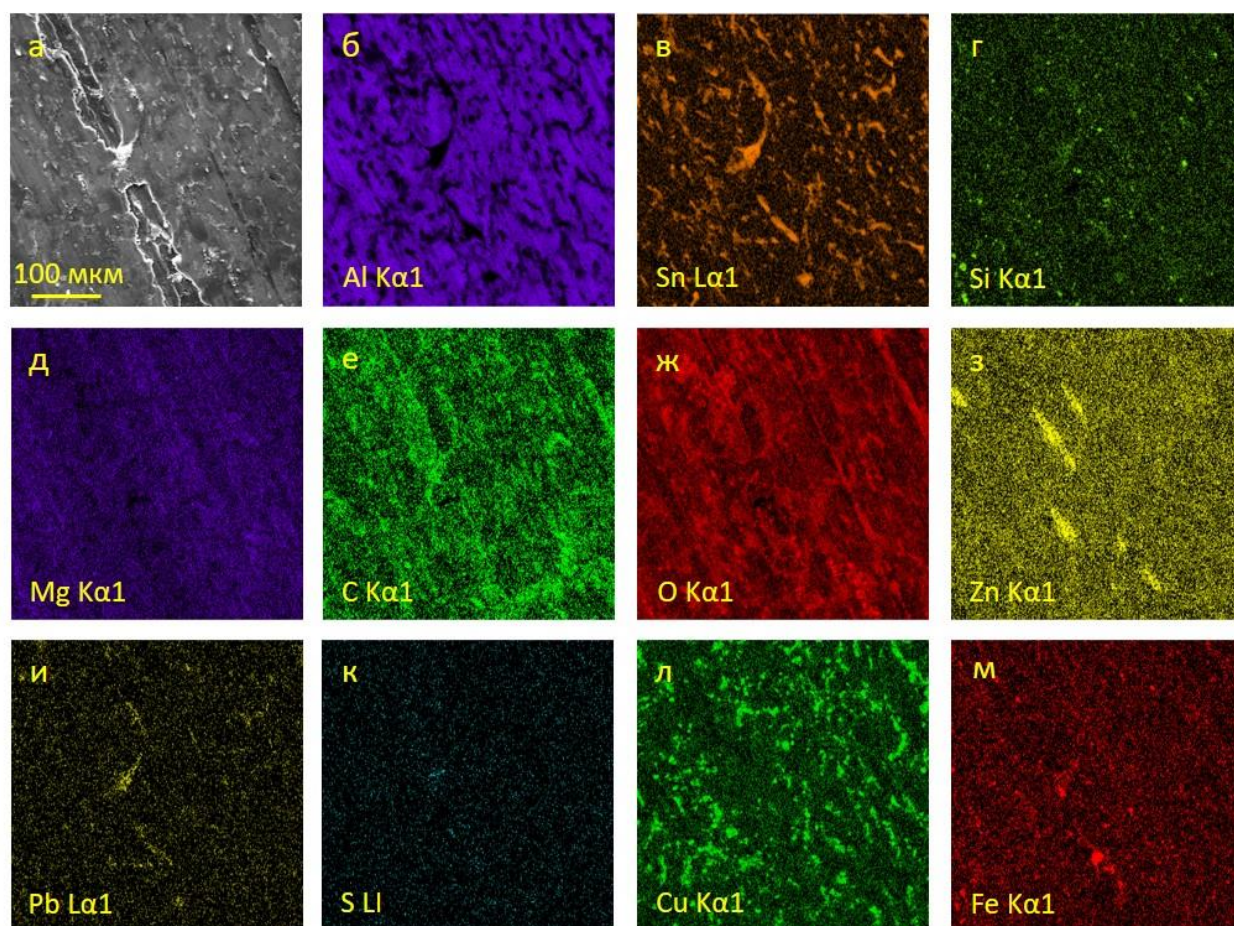


Рисунок 7. Снимок участка сплава АО-8,7 при увеличении $\times 500$ крат (а) и карты распределения элементов на данном участке (б-м)

В подповерхностном слое сплава АО-8,7, как и в случае с АО-5,8, концентрация алюминия у поверхности трения снижается в виду увеличения доли других

элементов. Количество магния в подповерхностном слое увеличено незначительно относительно основного объема матрицы, незатронутого трением. Концентрация цинка начинает плавно увеличиваться за 40 мкм до поверхности трения. Особенностью этого процесса в сплаве АО-8,7 является двухэтапное увеличение концентрации: постепенное возрастание с уменьшением расстояния до поверхности трения и небольшой, но резкий скачок непосредственно у поверхности трения. Такой характер изменения кривой указывает на более сложный принцип формирования Zn-насыщенных вторичных структур в матрице сплава АО-8,7, чем в сплаве АО-5,8. При этом другой механизм – насыщение магнием – практически не реализован.

Для подтверждения результатов ЭДС и выявления имеющихся соединений во вторичных структурах был проведен РФЭС-анализ (рисунок 8). Элементный состав вторичных структур представлен в таблице 8.

Полученные данные, в целом, согласуются с результатами ЭДС-анализа. Содержание алюминия на поверхности трения сплавов АО-5,8 и АО-8,7 практически одинаково и составляет 11,72 % и 11,62 % соответственно. Значительно отличается содержание олова и свинца: за счет распределения по поверхности в сплаве АО-5,8 было обнаружено 12,44 % олова и 15,68 % свинца. В сплаве АО-8,7 содержание олова составило 1,10 %, что в 12 раз меньше показателя сплава АО-5,8 и также указывает на его активное расходование при трении. Свинец лучше проявил свойства твердой смазки, ввиду чего присутствует в количестве 9,02 % и 15,68 % в АО-8,7 и АО-5,8 соответственно. При этом на поверхности было обнаружено 2,77 % цинка, что в 2 раза больше, чем в сплаве АО-5,8. С другой стороны, на поверхности трения сплава АО-5,8 значительно больше магния (4,27 % против 0,54 %). Это указывает на различный характер процессов формирования вторичных структур на сплавах. Концентрация другого компонента сплава – меди – в АО-5,8 в 3 раза ниже, чем в сплаве АО-8,7 (1,08 % и 3,28 % соответственно), что указывает на большое значение твердых включений по правилу Шарпи.

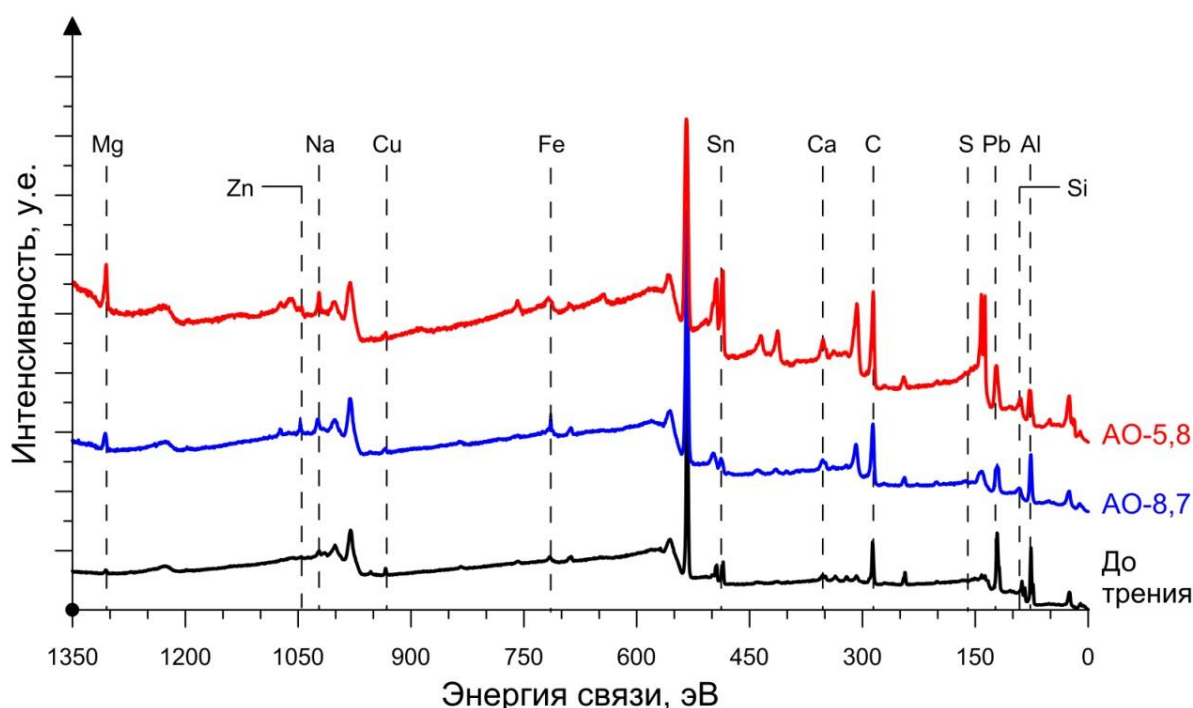


Рисунок 8. Обзорные РФЭС-спектры поверхностей трения сплавов АО-5,8 и АО-8,7

Таблица 8. Состав вторичных структур сплавов, полученный методом РФЭС

Сплав	Элементный состав, % масс.														
	C	O	Pb	Sn	Al	Mg	Zn	Cu	Fe	Si	S	Na	Cl	Ca	K
АО-5,8	29,9	16,2	15,6	12,4	11,7	4,2	1,0	1,0	0,8	0,5	4,6	0,4	0,5	0,3	0,2
АО-8,7	43,4	23,1	9,0	1,1	11,6	0,5	2,7	3,2	1,6	1,0	0,6	0,6	0,7	0,2	0,2

Всего в исходном состоянии было обнаружено 16 соединений. После трения во вторичных структурах было зафиксировано присутствие 24 соединений. Новообразованиями становились соединения и элементы Al-OC, C-O, C=O, O=C-O, PbS, Zn, Mg, MgCO₃. Присутствие металлического цинка и магния на поверхности было подтверждено РФЭС-спектрами высокого разрешения (рисунок 9). Полученные данные свидетельствуют о том, что формирование вторичных структур может происходить по-разному. Значительная разница видна на РФЭС-спектрах олова, свинца, магния и цинка.

Особенностью, обнаруженной в сплаве АО-5,8, стало формирование сульфида свинца PbS, подтвержденное результатами исследований. Термодинамический расчет данного соединения показал, что его образование сопровождается снижением энергии Гиббса, а сама реакция является спонтанной. Тем не менее, прохождение такой реакции свидетельствует о неравновесном состоянии поверхности трения и нижележащих слоев, в результате чего возрастает химическая активность элементов, и появляются соединения, которые не образуются при данных условиях в стационарном состоянии. Это характерно также для формирования карбоксида алюминия и оксидов нестехиометрического состава.

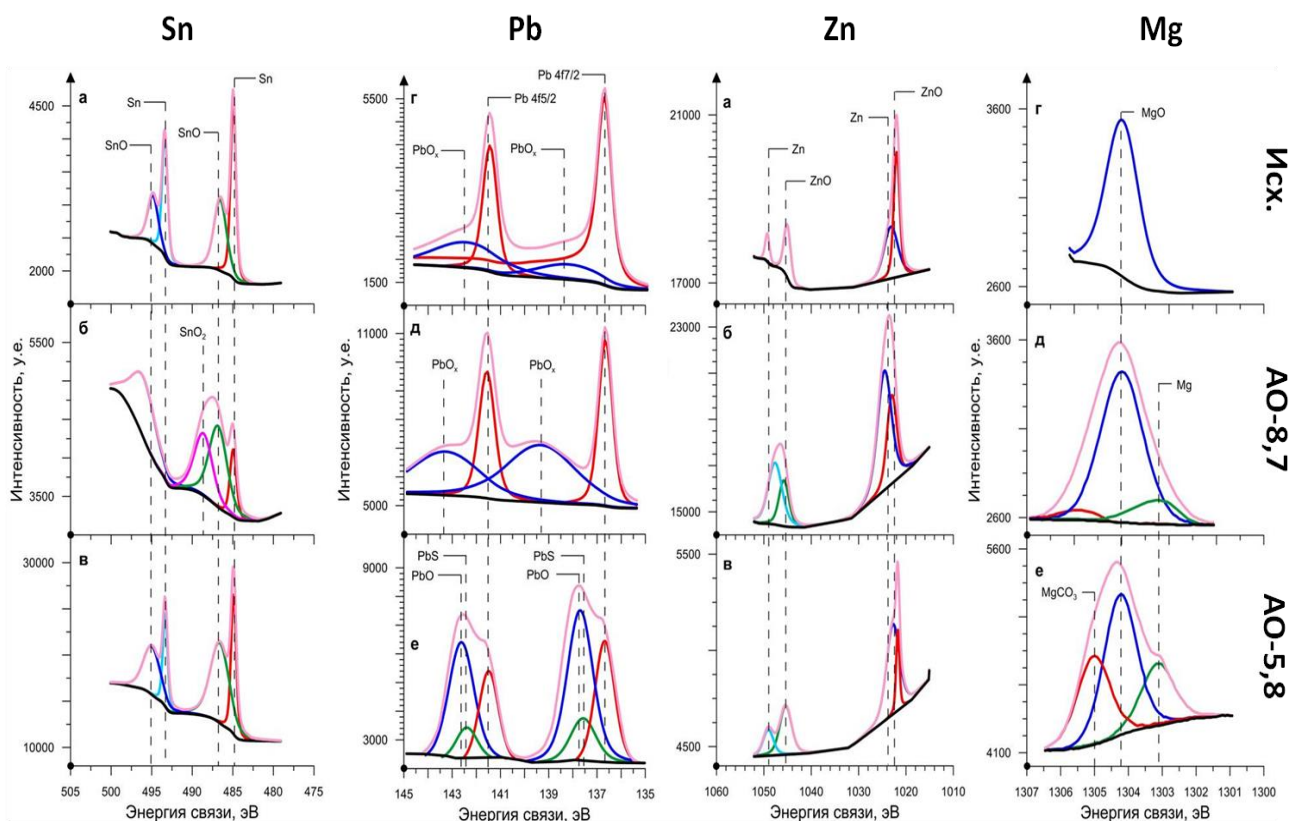


Рисунок 9. Спектры высокого разрешения олова, свинца, цинка и магния

Алюминиевые сплавы были получены литьем с медленным охлаждением с последующим отжигом, в результате чего получившийся твёрдый раствор алюминия, куда входил, в том числе, магний, находился в равновесном состоянии в соответствии с диаграммой состояния. Растворимость магния в алюминии согласно диаграмме состояния при нормальных условиях составляет около 5 %. Таким образом, обнаруженные области высокого содержания магния являются результатом прохождения несамопроизвольных процессов. Такие процессы сопровождаются отрицательным производством энтропии и, являясь частью диссипативных структур, указывают на прохождение самоорганизации при трении. Характерно, что это явление обнаружено только в сплаве АО-5,8, у которого был зафиксирован наименьший показатель износа. В данном сплаве концентрация магния во вторичных структурах как минимум в два раза выше, чем в сплаве АО-8,7. Следовательно, в абсолютных величинах в данном сплаве отрицательное производство энтропии также в два раза больше. Это обусловлено исходной разницей в легировании магнием: сплав АО-5,8 содержал 1,5 % Mg, в то время как в исходной композиции сплава АО-8,7 было только 0,5 % Mg. Таким образом, интенсивность износа сплавов данного состава может быть обусловлена способностью магния перераспределяться или выделяться из твердых растворов при трении. При этом, вероятно, существует некоторое критическое значение содержания магния в сплаве, которое обуславливает эффективность протекающего процесса с точки зрения снижения износа.

С другой стороны, в сплаве АО-8,7 отмечается повышенное содержание цинка на поверхности трения. Растворимость цинка в алюминии составляет менее 4 %, что также позволяет заключить о присутствии пересыщенного твердого раствора на поверхности. Сам факт повышенного содержания цинка и магния в рассматриваемых объемах материала указывает на его неравновесное состояние, необходимое для протекания самоорганизации. Учитывая худший показатель износа образца АО-8,7 среди всех сплавов, все же нельзя утверждать, что процесс сатурации поверхности трения цинком является нежелательным, негативно сказывающимся на износостойкости. Менее выраженным это явление присутствует и в сплаве АО-5,8. Следовательно, данный процесс является характерным для сплавов данного состава и инициируется при самоорганизации в процессе трения. Однако приоритетным, с точки зрения снижения износа, являются процессы перераспределения и выделения магния. Из этого можно сделать вывод, что самоорганизация в сплавах может протекать по-разному и зависит от исходного состава компонентов и их количественного соотношения.

Исследование сплавов после испытаний указывает на то, что при трении происходят значительные изменения в сплаве на глубине до 10 мкм. Значительные изменения элементного состава были зафиксированы на глубину до 1 мкм профилированием поверхности методом РФЭС (рисунок 10). Полученные результаты свидетельствуют о формировании трибологического слоя вторичных структур непосредственно на поверхности трения. Глубже происходит наклеп матрицы и увеличение концентрации некоторых ее компонентов. Благодаря массопереносу элементов к поверхности происходит также дисперсионное и дисперсное упрочнение материала. Таким образом, поверхностный слой и подповерхностное пространство сплава становятся больше похожими на функционально-градиентное покрытие, где задачей первого контактного слоя является обеспечение трения с

минимальными потерями, а последующих – повышение износостойкости материала. Снижение износа при этом достигается как за счет МСС, так и за счет протекания трибохимических реакций.

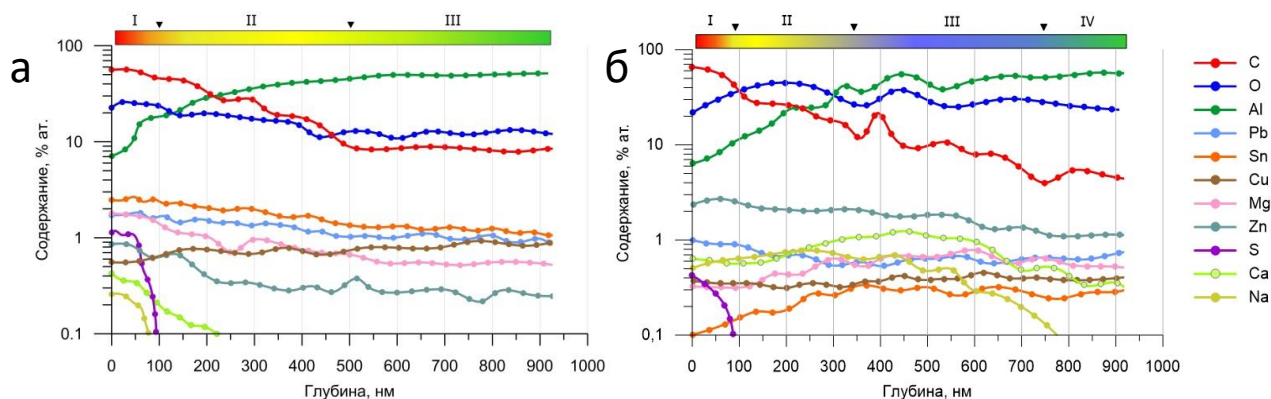


Рисунок 10. Изменение элементов вторичных структур по глубине в сплаве АО-5,8 (а) и АО-8,7 (б)

исследования показали, что при трении каждый элемент сплава и трибосистемы участвует в формировании вторичных структур на поверхности образцов. Наименьшая изношенность характерна сплавам с наибольшим содержанием олова на поверхности. При этом исходное большое содержание олова в сплаве не предопределяет высокую износостойкость: наибольший износ характерен именно среднеоловянистым сплавам. С повышением износа сплавов на поверхности трения возрастает концентрация цинка, что характерно для всех сплавов. Увеличение концентрации цинка является реакцией системы на износ материала при трении. Возрастание содержания магния на поверхности трения также является ответной реакцией системы на трение, оно сопровождается постепенным снижением износа. Сплавы (АО-11, АО-9,6, АО-8,7) с повышенным износом характеризовались изменением содержания магния на величину от минус 0,08 % до 0,19 % масс. на поверхности по сравнению с исходным состоянием. Сплавы с пониженным износом – на величину от 0,3 % до 0,7 % масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На поверхности трения антифрикционных алюминиевых сплавов происходят значительные изменения по сравнению с исходной микроструктурой, образуются вторичные структуры. Локально образуются различные типы вторичных структур с различным содержанием элементов. В данном процессе участвуют все объекты трибосистемы и окружающая среда.
2. Подтверждена возможность разработки антифрикционных сплавов на основе исследования образующихся вторичных структур на поверхности трения.
3. Процессы образования вторичных структур антифрикционных алюминиевых сплавов зависят как от набора легирующих элементов, так и от их концентрации.
4. При трении происходит массоперенос легирующих элементов меди, магния и цинка к трущейся поверхности. Массоперенос данных легирующих элементов приводит к дисперсионному упрочнению в подповерхностном слое.
5. В результате трения подповерхностный объем материала на глубину до 3 мкм находится в состоянии упругопластической деформации. Деформационное и дисперсионное упрочнение приводят к повышению микротвердости в 1,2 раза.

6. Методом РФЭС на поверхности трения было подтверждено увеличение количества новых химических соединений и простых веществ по сравнению с исходным состоянием с 16 до 24. Кроме кремния, все элементы сплава характеризуются увеличением количества соединений.

7. Поверхностность трения и нижележащие слои в процессе трения находятся в неравновесном состоянии из-за градиента температур, концентрации дефектов, механических напряжений и механоактивации, что ведет к потере термодинамической устойчивости, необходимой для самоорганизации сплава. В результате возрастает химическая активность элементов, и наблюдаются соединения, которые не образуются при данных давлениях и температуре в стационарном состоянии: карбонид алюминия, оксиды нестехиометрического состава, сульфид свинца.

8. При самоорганизации происходит снижение износа благодаря увеличению производства отрицательной энтропии за счет протекания несамопроизвольных реакций. Снижением энтропии сопровождаются процессы перераспределения и выделения цинка и магния из твёрдого раствора на основе алюминия на поверхности трения сплава, что не соответствует равновесным диаграммам состояния.

9. Поверхность и подповерхностный слой в результате трения представляют собой функционально-градиентную структуру, состоящую из нескольких слоев: металло-полимерная пленка вторичных структур; переходный слой; пересыщенный легирующими элементами твердый раствор алюминия и упрочненная твердая основа сплава.

10. Увеличение содержания магния в разрабатываемых сплавах повышает их износостойкость. Оптимальное содержание магния в исследованных антифрикционных алюминиевых сплавах составило 1,5 %.

11. Комплексное легирование алюминиевых антифрикционных сплавов позволяет снизить содержание олова до 5,8 % масс без ухудшения трибологических свойств.

12. Разработаны сложнолегированные алюминиевые антифрикционные сплавы с пониженным содержанием олова, превосходящие бронзу БрО4Ц4С17 по задиростойкости до 2,6 раз, по собственной износостойкости до 2 раз, меньше изнашивающие стальное контртело до 7,5 раз.

13. Изготовлена опытная партия монометаллических подшипников скольжения из разработанного сплава на основе АО-5,8. Были проведены успешные стендовые испытания данных подшипников на стенде ОАО «СКБТ» (г. Пенза) в составе серийного турбокомпрессора ТК33Н-02 и получена рекомендация к проведению эксплуатационных испытаний.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме работы

1. Развитие применённого нового способа разработки и оптимизации антифрикционных материалов на основе алюминия за счет влияния на процессы формирования вторичных структур для более широкого его применения в промышленности.

2. Целью дальнейших исследований в области повышения трибологических характеристик сплавов за счет образования вторичных структур является получение новых знаний о синергетическом влиянии легирующих элементов на свойства, а также совершенствование существующих пар трения на основе достигнутых результатов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК:

1. **Mironov, A.E.** Secondary Structures as Self-Organization Processes and Finishing Treatment of Friction Surfaces of Slide Bearings and Shafts [Text] / A.E. Mironov, P.A. Podrabinnik, E.V. Kuznetsova // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – № 11. – P. 197-202.

2. **Миронов, А.Е.** Алюминиевые литейные антифрикционные сплавы с повышенной способностью к приспособляемости поверхностей трения [Текст] / А.Е. Миронов, И.С. Гершман, Е.И. Гершман, С.М. Захаров, П.А. Подрабинник / *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. – 2017. - № 76(6). – С. 336-340.

3. **Миронов, А.Е.** Новые антифрикционные алюминиевые сплавы для литых монометаллических подшипников скольжения. Стендовые испытания [Текст] / А.Е. Миронов, Г.Г. Антюхин, Е.И. Гершман, П.А. Подрабинник, Е.В. Кузнецова, П.Ю. Перетягин / *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. – 2020. - № 79(4). – С. 217-223.

Публикации в журналах, индексируемых в базах данных

Web of Science и Scopus:

4. **Podrabinnik, P.A.** Mechanisms involved in the formation of secondary structures on the friction surface of experimental aluminum alloys for monometallic journal bearings [Text] / P.A. Podrabinnik, I.S. Gershman, A.E. Mironov, E.V. Kuznetsova, P.Yu. Peretyagin // *Lubricants*. – 2018. – № 6(4). – 104.

5. **Kuznetsova, E.V.** The effect of elements of secondary structures on the wear resistance of steel in friction against experimental aluminum alloys for monometallic journal bearings [Text] / E.V. Kuznetsova, I.S. Gershman, A.E. Mironov, P.A. Podrabinnik, P.Yu. Peretyagin // *Lubricants*. – 2019. – № 7(3). – 21.

6. **Mironov, A.E.** Influence of secondary structures formation on tribological properties of aluminum alloys-steel friction pairs [Text] / A.E. Mironov, I.S. Gershman, P.A. Podrabinnik, E.V. Kuznetsova // *Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTRIB 2019*. – 2019. – P. 119-125.

7. **Podrabinnik, P.A.** The Influence of Secondary Structures on Wear Resistance of Experimental Aluminum Alloys for Monometallic Slide Bearings [Text] / P.A. Podrabinnik, A.E. Mironov, I.S. Gershman // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – № 11. – P. 175-180.

8. **Gershman, I.S.** Influence of the nonequilibrium material state on wear resistance [Text] / I.S. Gershman, A.E. Mironov, S. Veldhuis, E.I. Gershman, P.A. Podrabinnik, E.V. Kuznetsova // *Lubricants*. – 2019. – № 7(6). – 53.

9. **Smirnov, A.** Effect of milling conditions on the microstructural design in aluminum based alloy fabricated by SPS [Text] / A. Smirnov, E.V. Kuznetsova, Y.O. Pristinsky, P.A. Podrabinnik, A.E. Mironov, I.S. Gershman, P.Yu. Peretyagin // *Metals*. – 2019. – № 9(11). – 1164.

10. **Gershman, I.S.** Relationship of secondary structures and wear resistance of antifriction aluminum alloys for journal bearings from the point of view of self-organization during friction [Text] / I.S. Gershman, A.E. Mironov, P.A. Podrabinnik, E.V. Kuznetsova, E.I. Gershman, P.Yu. Peretyagin // *Entropy*. – 2019. – № 21(11). – 1048.

11. **Podrabinnik, P.A.** Tribochemical interaction of multicomponent aluminum alloys during sliding friction with steel [Text] / P.A. Podrabinnik, I.S. Gershman, A.E. Mironov, E.V. Kuznetsova, P.Yu. Peretyagin // Lubricants. – 2020. – № 8(3). – 24.

12. **Mironov, A.E.** Properties of journal bearing materials that determine their wear resistance on the example of aluminum-based alloys [Text] // A.E. Mironov, I.S. Gershman, E.I. Gershman, P.A. Podrabinnik, E.V. Kuznetsova, P.Yu. Peretyagin, N.Yu. Peretyagin // Materials. – 2021. – vol. 14. - № 3. – 535. – p. 1-11. – DOI: 10.3390/ma14030535.

Публикации в других научных изданиях:

13. **Смирнов, А.** Исследование микроструктуры, элементного и фазового состава спеченных многокомпонентных алюминиевых сплавов, подготовленных по различным технологиям механического легирования [Текст] / А. Смирнов, А.Е. Миронов, И.С. Гершман, Е.В. Кузнецова, П.А. Подрабинник, Н.Ю. Перетягин, Ю.О. Пристинский // Материалы XII международной конференции «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ-2019)». – Москва: 2019. – С. 134-144.

14. **Кузнецова, Е.В.** Влияние вторичных структур на износостойкость стального контртела при работе с экспериментальными алюминиевыми подшипниковыми сплавами [Текст] / Е.В. Кузнецова, И.С. Гершман, А.Е. Миронов, П.А. Подрабинник // Труды XII Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению 2018». – Москва: 2018. – С. 267-270.

15. **Подрабинник, П.А.** Механизмы образования вторичных структур на поверхности трения экспериментальных алюминиевых сплавов для монометаллических подшипников скольжения [Текст] / П.А. Подрабинник, И.С. Гершман, А.Е. Миронов, Е.В. Кузнецова // Труды XII Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению 2018». – Москва: 2018. – С. 405-409.

16. **Гершман, И.С.** Исследование влияния вторичных структур на трибологические характеристики пары трения: алюминиевый сплав -стальное контртело [Текст] / И.С. Гершман, А.Е. Миронов, П.А. Подрабинник, Е.В. Кузнецова // тезисы доклада четвертого междисциплинарного научного форума с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии 2018". – Москва: 2018. – С. 59-61.

Патенты РФ на изобретения

1. **Пат. 2702530 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/16, С 22 С 21/18.** Антифрикционный алюминиевый литейный сплав для монометаллических подшипников скольжения [Текст] / Гершман И.С., Миронов А.Е., Солис Пинарготе Н.В., Подрабинник П.А., Перетягин Н.Ю. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». - № 2018141938 : заявл. 28.11.2018 ; опубл. 08.10.2019, Бюл. № 28.

2. **Пат. 2725494 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/00, С 22 С 30/00, С 22 С 1/03.** Спеченная лигатура из порошковых материалов для легирования алюминиевых сплавов скольжения [Текст] / Гершман И.С., Миронов А.Е., Солис Пинарготе Н.В., Подрабинник П.А., Кузнецова Е.В., Смирнов А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». - № 2019129342 : заявл. 18.09.2019 ; опубл. 02.07.2020, Бюл. № 19.

3. **Пат. 2725496 Российская Федерация, МПК С 22 С 35/00, С 22 С 1/04.** Спеченная лигатура из порошковых материалов для легирования алюми-

вых сплавов [Текст] / Гершман И.С., Миронов А.Е., Солис Пинарготе Н.В., Подрабинник П.А., Кузнецова Е.В., Смирнов А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». - № 2019129344: заявл. 18.09.2019 ; опубл. 02.07.2020, Бюл. № 19.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В публикациях с соавторами личный вклад заключается в следующем: пробоотбор и пробоподготовка образцов для исследований [1-5, 8-16]; исследование методом сканирующей электронной микроскопии полученных образцов [1-6. 8-16]; разработана методика анализа вторичных структур на поверхностях трения образцов [1, 4, 8]; разработка методики подготовки исходной композиции для получения антифрикционных материалов на основе алюминия [6, 13], установлено влияние легирующих компонентов на антифрикционные свойства материалов и формирование вторичных структур [1, 2, 8]; предложены пути повышения антифрикционных свойств алюминиевых сплавов за счет формирования вторичных структур [1, 5, 7, 8]; определены закономерности формирования вторичных структур антифрикционных алюминиевых сплавов [1, 10-12, 15].

Подрабинник Павел Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ
ТРЕНИЯ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.10.2021. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.

Тираж 100 экз. Заказ № 10847

Издательский центр ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Адрес университета: 127055, Москва, Вадковский пер.,1