

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

44.2.005.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РОСЖЕЛДОР), по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27.12.2021 № 7

О присуждении Подрабиннику Павлу Анатольевичу, Российская Федерация, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование вторичных структур на поверхности трения сложно-легированных алюминиевых сплавов и их влияния на трибологические свойства» по специальности 2.5.3 – «Трение и износ в машинах» принята к защите 18.10.2021 г., протокол № 5, диссертационным советом 44.2.005.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РОСЖЕЛДОР, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2. Приказ Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012), далее – ФГБОУ ВО РГУПС.

Соискатель Подрабинник Павел Анатольевич, 25 ноября 1989 г.р., в 2012 г. окончил федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» с присуждением квалификации «инженер по специальности «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов». В 2016 г. окончил очное отделение аспирантуры ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Минобрнауки России) по направлению 15.02.06 «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов». Работает в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» с 2013 года; в должности заведующего лабораторией кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» с 2019 г. по настоящее время.

Диссертация выполнена на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Минобрнауки России).

Научный руководитель – доктор технических наук Гершман Иосиф Сергеевич, 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)» (ФГБОУ ВО МАИ); Бурлакова Виктория Эдуардовна - доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ТвГТУ), в своем положительном заключении, подписанном доктором технических наук, профессором кафедры «Прикладная физика» Измайловым Владимиром Васильевичем и кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры «Технология металлов и материаловедение» Афанасьевой Людмилой

Евгеньевной и утвержденном ректором университета доктором физико-математических наук, профессором Твардовским Андреем Викторовичем, указала, что диссертация Подрабинника П.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложено новое решение актуальной задачи – разработка антифрикционных сплавов для подшипников скольжения на основе процессов, происходящих при формировании вторичных структур на поверхности трения. Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Подрабинник Павел Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах».

Соискатель имеет 41 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы, в изданиях, включенных в базу данных Web of Science и Scopus – 9 работ, 3 патента РФ на изобретения. Объем опубликованных работ по теме диссертации 9,44 п.л. Авторский вклад 5,58 п.л. Все публикации достаточно полно отражают основные результаты исследований и посвящены проблемам снижения интенсивности изнашивания в парах трения «подшипник скольжения – вал», развитию подходов к разработке новых антифрикционных материалов на основе исследования вторичных структур. Имеются ссылки на авторов и источники заимствования.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. 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.

2. Миронов, А.Е. Новые антифрикционные алюминиевые сплавы для литых монOMETаллических 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.

3. 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.

4. Gershman, I.S. Relationship of secondary structures and wear resistance of antifric-tion 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.

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

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

- **ведущей организации** – ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»). Отзыв положительный. Замечания: **1.** Отсутствует проверка статистической значимости предполагаемых зависимостей трибологических характеристики от процентного содержания того или иного химического элемента. **2.** При описании методики экспериментов для лучшего понимания структурного состояния сплавов следовало бы описать способ выплавки экспериментальных

сплавов и режимы последующего отжига. **3.** Следовало бы более подробно аргументировать выбор материала контртела (сталь 38ХНЗМА) и смазочного материала (моторного масла М14В2). Если выбор референсной бронзы объясняется ее широким использованием в подшипниках скольжения (стр. 40 диссертации), то никаких аргументов в пользу выбранной марки стали и смазочного материала не приводится. **4.** В диссертации не указано, каким способом проводили измерения температуры образца, в частности, как были получены данные в табл. 4.2 на стр. 75. **5.** Площадь пятна контакта после приработки образцов на машине трения на стр. 48 названа фактической, а на стр. 49 она стала называться контурной. Ни тем, ни другим в традиционно сложившемся в трибологии понимании терминов «фактическая» и «контурная» площади контакта она не является, и данные названия некорректны. **6.** Для характеристики износостойкости материалов автор использует понятие «весовой износ» (например, стр. 70 – 72 диссертации), хотя правильнее называть его «массовый износ». **7.** В таблице 1.4 на стр. 26 диссертации приведены значения σ_b – предела прочности на растяжение антифрикционных сплавов в МПа. Однако автор эту характеристику назвал удельной прочностью, что неверно. Удельная прочность – это отношение прочности к плотности материала. В той же таблице в качестве единиц измерения твердости по Бринеллю указаны МПа, что, по-видимому, является опечаткой и приведены просто числа твердости по шкале Бринелля. **8.** В пункте «Степень разработанности темы исследований» фактически перечисляются фамилии исследователей, чьи работы так или иначе причастны к теме диссертации и оценки степени ее разработанности как таковой не дается. При дальнейшем подробном аналитическом обзоре данный пункт представляется излишним;

- **официального оппонента** – д.т.н., профессора кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (ФГБОУ ВО МАИ) **Асланян Ирины Рудиковны**. Отзыв положительный. Замечания: **1.** В работе все внимание уделено исследованию только одного объекта трибосистемы – подшипника. Таким образом, сложно оценить влияние других объектов на полученные трибологические свойства. Следовало также провести исследования стального контртела и смазки для оценки влияния процессов, которые в них происходят, на трибологические свойства трибосистемы. **2.** Температура является важным аспектом, влияющим на протекание процессов на поверхности трения и образование вторичных структур. Однако в работе уделено недостаточно внимания оценке температуры в зоне трения, ограничившись лишь исследованием пирометром температуры на стальном ролике, что, в сущности, отражает лишь температуру смазки. **3.** Трибологические свойства алюминиевых сплавов автор связывает с формированием вторичных структур, элементный состав которых был получен методом энергодисперсионного анализа. Описывается роль содержания каждого элемента на полученные свойства. Однако известно, что методом энергодисперсионного анализа сложно провести достаточно точный количественный анализ легких элементов, таких как углерод. Также не приведены интервалы измеренных значений содержания элементов. **4.** Автором показано, что при трении происходят несамопроизвольные трибохимические процессы выделения и перераспределения магния и цинка, что снижает интенсивность изнашивания сплавов. Следовало бы также оценить количественное влияние этого процесса на уменьшение износа;

- **официального оппонента** – д.т.н., профессора, заведующей кафедры «Химия» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» (ФГБОУ ВО «ДГТУ») **Бурлаковой Виктории Эдуардовны**. Отзыв положительный. Замечания: **1.** Отсутствует подробное описание технологии получения алюминиевых сплавов. **2.** В качестве одного из регистрируемых параметров при трении указана температура, однако методика ее измерения не описана. **3.** Не затронута проблема корректности полученных данных методом энергодисперсионного анализа для свинца и серы, у которых совпадают характеристические линии на спектрограмме. **4.** В работе отмечается, что прохождение самоорганизации – процесс вероятностный. При этом отсутствует обсуждение вероятности наступления самоорганизации и были ли отмечены ее признаки в других сплавах, показавшие худшие трибологические характеристики. **5.** Рентгенофазовый анализ образцов после трения был проведен по процедуре, предполагающей исследование объемных материалов. Для исследования вторичных структур целесообразнее было бы проводить рентгенофазовый анализ по методу скользящих пучков, применяющимся для изучения тонких пленок.

На автореферат поступило 8 отзывов. Все отзывы положительные.

1. Отзыв д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории трибологии ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН) **Солдатенкова Ивана Алексеевича**. Замечания: **1.** В качестве одной из задач исследования, поставлена следующая задача: «Проанализировать и определить теоретические основы снижения износа трущихся тел в процессе трения за счет образования вторичных структур» (с. 4). Также теоретические исследования упоминаются на с. 5 автореферата и в Заключение (с.21). Однако какое-либо систематическое описание теоретических результатов, полученных в работе, в автореферате отсутствует. **2.** Как можно понять из автореферата, трибологические испытания проводились при постоянной скорости скольжения (500 об/мин). Однако, известно, что скорость скольжения может оказывать существенное влияние на протекание трибологических процессов, в частности, на образование задира. Из автореферата трудно понять, чем обусловлен и как обосновывается выбор единственной скорости скольжения при испытаниях.

2. Отзыв д.т.н., главного научного сотрудника кафедры обработки металлов давлением ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (ФГАОУ ВО «НИТУ МИСИС») **Белова Николая Александровича**. Замечания: **1.** Из автореферата неясны причины выбора тех или иных легирующих компонентов для выплавки экспериментальных алюминиевых сплавов и их концентрация. **2.** Автор приводит условия проведения экспериментальных исследований, однако неясно, чем они обусловлены.

3. Отзыв д.т.н., профессора кафедры «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» **Полякова Сергея Андреевича**. Замечания: **1.** Отсутствие математических моделей исследуемых процессов, а также отсутствие информации о статистических оценках представленных экспериментальных данных, что затрудняет оценку достоверности результатов, в том числе, при их сопоставлении с данными других авторов.

4. Отзыв д.т.н., профессора, главного научного сотрудника, и.о. заведующей лабораторией Методов и технологий упрочнения ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) **Куксеновой Лидии Ивановны**. Замечания:

1. В узле трения подшипник скольжения – вал применяются разные по природе и свойствам смазочные материалы с разными присадками, в том числе с присадками, реализующими пластифицирующий эффект. Поэтому для процессов структурообразования важным является роль среды, в которой имеет место контактная деформация. С моей точки зрения, это следовало бы отразить как в обзоре литературных источников, так и при обсуждении полученных результатов. **2.** Триботехнические испытания проводились в режиме граничного трения в масле M14B2. Не ясно, по каким критериям и в сравнении с какими экспериментами автор делает вывод, что этот вид трения обеспечивает интенсификацию трения и повышение вероятности выхода материала из равновесного состояния, стр. 9 автореферата.

5. Отзыв д.т.н., профессора кафедры «Материаловедение в машиностроении» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «НГТУ») **Бурова Владимира Григорьевича** и к.т.н., доцента кафедры «Материаловедение в машиностроении» ФГБОУ ВО «НГТУ» **Попелюха Альберта Игоревича**. Замечания: **1.** Одна из задач, решаемых в данной работе, заключалась в разработке новых алюминиевых сплавов с высокими триботехническими свойствами, которые обладают повышенными прочностными характеристиками и, в отличие от стандартных алюминиевых антифрикционных сплавов, могут быть использованы для изготовления монометаллических подшипников скольжения. Поэтому в качестве материалов для сравнения кроме бронзы BrO4Ц4C17 в таблицах 2 и 4 целесообразно было указать механические свойства стандартных алюминиевых сплавов близкого химического состава, например марки АО 9-1, что позволяет более убедительно продемонстрировать достоинства новых антифрикционных алюминиевых сплавов с пониженным содержанием олова. **2.** В общих выводах по работе целесообразно было указать, какие типы вторичных структур оказывают наиболее благоприятное влияние на триботехнические свойства алюминиевых сплавов.

6. Отзыв к.т.н., заведующего лабораторией «Тепловозы» научного центра «Тяга поездов» АО «Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ») **Силюты Анатолия Геннадьевича**. Замечания: **1.** Не описаны условия проведения термообработки при изготовлении экспериментальных алюминиевых сплавов. **2.** Условия подачи смазочного материала при экспериментальных исследованиях действительно не позволяют считать трение гидродинамическим, однако неясно, за счет чего тип трения определен как граничное, а не смешанное.

7. Отзыв д.т.н., профессора, советника ректора ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» **Аксенова Андрея Анатольевича**. Замечания: **1.** В работе утверждается, что обнаруженное соединение сульфид свинца PbS сформировалось в результате выхода материала из термодинамического равновесия, т.к. температура, зарегистрированная при испытаниях, не достигала требуемой для синтеза 600 °С. При граничном трении существует вероятность кратковременного повышения температуры до указанного значения и выше на локальных участках в зоне трения, что ставит под сомнение обоснованность приведенного вывода. **2.** На рисунках 4 в, г видно совпадение карт элементов олова и кальция на поверхности трения, однако данный факт автором не обсуждается в отличие от совпадений для элементов свинец-сера и магний-углерод-кислород, на основании которых сделаны основные выводы.

8. Отзыв д.т.н., профессора, главного научного сотрудника лаборатории физики упрочнения поверхности Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН **Сизовой Ольги Владимировны**. Замечания: **1.** На стр.8 автореферата приедена кинематическая схема трибологических испытаний, на которой присутствует контртело, однако состав его материала не указан, и сведений о переносе элементов материалов контртела в зону трения не приводится. **2.** Автореферат перегружен промежуточными результатами, не соблюден порядок расположения и объем требуемых пунктов общей характеристики: отсутствует раздел «соответствие паспорту специальности», а раздел «личный вклад соискателя» перенесен на последнюю страницу обложки реферата. Общий объем автореферата превышает рекомендованный.

Выбор ведущей организации определяется специализацией и достаточно высоким уровнем ее лабораторий в рассматриваемой области исследований, значительным количеством эффективных разработок и широким кругом публикаций ее сотрудников в ведущих специализированных изданиях. Выбор официальных оппонентов обосновывается достижением ими ряда значимых результатов в рассматриваемой области исследования, публикационной активностью, наличием опыта работы в области создания новых технологий.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработаны** новые антифрикционные сложнолегированные сплавы на основе алюминия, превосходящие по трибологическим свойствам применяемые более дорогостоящие оловянные бронзы за счет повышенной способности к самоорганизации при трении;

- **предложен** способ разработки антифрикционных материалов с повышенным комплексом трибологических характеристик за счет образования вторичных структур на поверхности трения;

- **доказана** возможность прохождения несамопроизвольных процессов при трении, сопровождающихся отрицательным производством энтропии, что способствует снижению интенсивности изнашивания многокомпонентных алюминиевых антифрикционных сплавов;

- **сформулированы** выводы: о механизмах образования вторичных структур при трении и их влиянии на трибологические характеристики и о снижении содержания олова в составе антифрикционных алюминиевых сплавов за счет комплексного легирования.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **доказана** эффективность применения теории самоорганизации для обоснования возможности снижения интенсивности изнашивания при трении антифрикционных сплавов;

- **применительно** к проблематике диссертации результативно использованы передовые возможности структурного, фазового, химического и элементного исследования состава материалов, а также теоретические методы оценки и статистической обработки полученных данных;

- **изложена** методика разработки новых антифрикционных материалов на основе исследования вторичных структур и закономерностей их образования на поверхности трения;

- **раскрыта** существенная роль вторичных структур в диссипации энергии, сообщаемой телу при трении, и проблема управления самоорганизацией;

- **изучена** связь исходного составов исходного алюминиевого сплава и сформированных в результате трения вторичных структур с комплексом трибологических характеристик;

- **проведена модернизация** методов сравнения антифрикционных материалов по их трибологическим характеристикам на основе их базовых критериев.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- **разработаны и успешно пройдены стендовые испытания:** монометаллические подшипники скольжения на основе новых антифрикционных алюминиевых сплавов, легированных оловом, свинцом, медью, кремнием, цинком и магнием, на стенде ОАО «СКБТ» (г. Пенза) в составе серийного турбокомпрессора ТК33Н-02 с рекомендацией к проведению эксплуатационных испытаний

- **определены:** перспективы дальнейшей разработки новых антифрикционных материалов на основе формирования вторичных структур в процессе самоорганизации;

- **представлены:** предложения по дальнейшему совершенствованию и развитию методов разработки сплавов на основе алюминия с повышенными трибологическими свойствами.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- **для экспериментальных работ:** достоверность обеспечена проведением экспериментов на машине трения с кинематической схемой, приближенной к реальным условиям эксплуатации при выборке в три – пять параллельных опытов и последующей их статистической обработкой;

- **теория** основана на классических данных, представленных в исследованиях самоорганизации при трении, и развивает теорию совместимости контактных поверхностей Н.А. Буше;

- **идея базируется** на синтезе существующей информации о трении с новым комплексом практических данных на основе системы термодинамического воздействия с отрицательным производством энтропии, что снижает износ;

- **использованы** современные апробированные методики исследования трибологических характеристик, механических свойств и элементного, фазового и химического состава;

- **установлено** качественное совпадение результатов механизмов образования вторичных структур, с аналогичными данными, опубликованными в работах других исследователей;

- **использованы** данные, содержащиеся в опубликованных материалах о влиянии исследуемых легирующих компонентов на трибологические характеристики алюминиевых сплавов.

Личный вклад соискателя состоит в: участии в постановке цели и формулировке задач исследований; написании аналитического обзора; участии в экспериментальной основе научных статей и тезисов конференций; работе на современном экспериментальном оборудовании (сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, микроиндентирование и подготовка экспериментальных образцов).

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания, связанные с отсутствием определения зоны рациональных нагрузочно-скоростных режимов эксплуатационного применения монометаллических подшипников на основе сложнолегированных алюминиевых сплавов. Автору следует обратить внимание на условия реализации самоорганизации при трении монометаллических подшипников.

Соискатель Подрабинник П.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию о том, что дальнейшее развитие и расширение зоны применения нагрузочно-скоростных режимов будет выполнено в последующих исследованиях. Самоорганизация при трении была отмечена и описана в работе при граничном трении исследуемых подшипников из алюминиевых сплавов и стального контртела. Анализ процесса самоорганизации выполнен для конкретных условий трения, приведенных в диссертации.

Диссертация охватывает все поставленные в работе научные задачи; обладает внутренним единством, содержит научную новизну и практическую значимость, а также данные о вкладе автора в науку о трении. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На заседании «27» декабря 2021 года диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научно обоснованные решения, направленные на разработку новых антифрикционных алюминиевых сплавов на основе исследования формирующихся на поверхности трения вторичных структур присудить Подрабиннику П.А. ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.5.3. – «Трение и износ в машинах».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 10 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящего в состав совета, проголосовали: за – 15, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета
44.2.005.01 академик РАН,
д-р техн. наук, профессор



Колесников Владимир Иванович

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.01
д-р техн. наук, профессор

Щербак Петр Николаевич

27.12.2021 г.