ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР (ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД) УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 05.11.2026 № 186

О присуждении Дудину Дмитрию Сергеевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Описание высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов связанными уравнениями хемомеханики» по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 02.09.2026, протокол № 180, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018.

Соискатель Дудин Дмитрий Сергеевич 1996 г. рождения, в 2020 г. с отличием окончил магистратуру ФГБОУ ВО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" по направлению подготовки «Прикладная механика». В 2024 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в ФГБОУ ВО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. В настоящее время работает ведущим инженером лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред. Диссертация выполнена в ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (ПФИЦ УрО РАН).

Научный руководитель – заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела, д.ф.-м.н., доцент Келлер Илья Эрнстович.

Официальные оппоненты:

1. Фрейдин Александр Борисович, доктор физико-математических наук (01.02.04), заведующий лабораторией математических методов механики материалов ФГБУН "Институт проблем машиноведения РАН", г. Санкт-Петербург;
2. Фомин Леонид Викторович, кандидат физико-математических наук (01.02.04), заведующий лабораторией проектирования и прикладных методов расчёта композитных конструкций НИИ механики ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова", г. Москва;

дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН", г. Новосибирск (ИГиЛ СО РАН), в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником лаборатории механики композитов, д.ф.-м.н. А.В. Шутовым, и

утвержденном и.о. директора ИГиЛ СО РАН, д.ф.-м.н. Е.М. Рудой, указала, что диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу в области теоретического исследования высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов. Актуальность темы объясняется необходимостью увеличения эксплуатационного ресурса деталей газотурбинных двигателей, подверженных воздействию агрессивных продуктов сгорания топлива и веществ из окружающей среды при высоких температурах. Выполненные теоретические исследования вносят важный вклад в развитие теории многокомпонентной механики деформируемого твёрдого тела, который способствует пониманию связанных процессов взаимной диффузии, химических реакций и деформирования в металлических сплавах при воздействии агрессивных сред. Представленная диссертационная работа «Описание высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов связанными уравнениями хемомеханики» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Дудин Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Соискателем опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 статьи в коллективных монографиях по механике деформируемого твердого тела, индексируемые в Scopus, и 6 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК и международные базы цитирования:

1. **Dudin D.S.**, Keller I.E. On the spectrum of relaxation times in coupled diffusion and rheological processes in metal alloys // Advanced Structured Materials. — 2021. — Vol. 137. — P. 41–55. (Scopus)

В работе построена связанная модель взаимной диффузии в вязкоупругом теле и аналитически определены и проанализированы эффективные коэффициенты диффузии и характерные времена релаксации возмущенного механически и термодинамически равновесного состояния трехкомпонентной среды. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

2. **Dudin D.S.**, Keller I.E. On description of fast diffusion in a coupled multicomponent system with microstructure within the framework of the thermodynamics of irreversible processes // Advanced Structured Materials. — 2021. — Vol. 141. — P. 81–95. (Scopus)

В работе исследована возможность описания быстрой диффузии связанной системой уравнений взаимной диффузии в многокомпонентном вязкоупругом теле. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

3. **Дудин Д.С.**, Келлер И.Э. Обзор подходов к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии в вязкоупругом теле // Химическая физика и мезоскопия. — 2022. — Т. 24, № 3. — С. 296–311. (RSCI)

Выполнен обзор подходов к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии в вязкоупругом теле. Показано, что эта формулировка требует принятия той или иной гипотезы о разделения движения на конвективное и диффузионное. Построена одна из связанных моделей, предполагающая, что диффузия и относительное движение материала рассматривается относительно маркеров. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

4. **Dudin D.S.**, Keller I.E. On the spectrum of relaxation times of coupled diffusion and rheological processes in media with microstructure // Advanced Structured Materials. — Springer, 2023. — Vol. 170. — P. 141–158. (Scopus)

В работе построена связанная модель взаимной диффузии в вязкоупругом теле с эволюцией и переносом микроструктурного параметра на основе термодинамики необратимых процессов и маркерного описания диффузионного и конвективного движения многокомпонентного материала. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

5. **Dudin D.S.**, Keller I.E. On the decomposition of motion in the description of interdiffusion in a viscoelastic body // Mechanics of Solids. — 2024. — Vol. 59, no. 7. — P. 3781–3797. (WoS)

Проанализированы подходы к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии в вязкоупругом теле. Показано, что эта формулировка требует принятия той или иной гипотезы о разделения движения на конвективное и диффузионное. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

6. **Дудин Д.С.**, Келлер И.Э. Описание сульфидно-оксидной и хлоридной коррозии жаропрочных сплавов с учётом напряжений. I. Математическая модель // Вестник ЧГПУ им. И.Я.Яковлева. Механика предельного состояния. — 2025. — № 1(63). — С. 123–133. (ВАК)

В работе сформулирована связанная система уравнений взаимной диффузии, упругих, вязких и пластических деформаций и химических реакций компонентов металлического сплава и агрессивной среды. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

7. **Дудин Д.С.**, Келлер И.Э. Описание сульфидно-оксидной и хлоридной коррозии жаропрочных сплавов с учётом напряжений. II. Расчет и сравнение с экспериментом // Вестник ЧГПУ им. И.Я.Яковлева. Механика предельного состояния. — 2025. — № 2(64). — С. 77–86. (ВАК)

На основе ранее сформулированных уравнений взаимной диффузии, упругих, вязких и пластических деформаций и химических реакций компонентов металлического сплава и агрессивной среды построены модели сульфидно-оксидной и хлоридной коррозии металлического сплава и поставлены соответствующие краевые задачи. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

8. **Dudin D.S., Keller I.E.** Simulation of high-temperature oxidation in NiCr alloy based on a chemo-mechanical coupled model // Mechanics of Solids. — 2026. — Vol. 61, art. no. 36. (WoS)

Построена термодинамически согласованная система уравнений хемомеханики, которая описывает связанные процессы взаимной диффузии и конечных упруговязкопластических деформаций с сопровождающими химическими реакциями в многокомпонентном твёрдом теле и сочетает в себе материальный подход к описанию деформирования вместе с маркерным описанием диффузии. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

9. **Дудин Д.С.**, Келлер И.Э. Моделирование высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии сплава $Fe_{76}Cr_{24}$ связанной моделью хемомеханики // Вычислительная механика сплошных сред. — 2026. — Т. 19, №1 — С. 76–94. (ВАК, Scopus)

Модель хемомеханики использована для исследования процессов высокотемпературного окисления и сульфидно-оксидной коррозии сплава $Fe_{76}Cr_{24}$, результаты расчета которых согласуются с экспериментом. Исследована роль связанности процессов, конечности деформаций и ползучести в описании данных эксперимента, выяснены контролирующие коррозию процессы. Авторский вклад Дудина Д.С. в публикацию составляет 50%.

Публикации содержат в сумме 158 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Фрейдина А.Б. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; отмечены теоретическая и практическая значимость, новизна, достоверность полученных результатов и апробация работы. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- замечание об использовании термина «слоистая структура продуктов коррозии»;
- вопрос о целесообразности пересчёта модели (глава 3) в терминах лагранжевой диффузии;
- вопрос по учёту влияния девиатора тензора напряжений на скорости химических реакций в модели (глава 3);
- вопрос о блокировке фронта химической реакции при действии напряжений;
- вопрос об учёте механизма диффузионной ползучести в модели (глава 3);
- замечание об указании конкретных ответственных деталей газотурбинных двигателей, подверженных высокотемпературной солевой коррозии;
- замечание об отсутствии пояснения к функции Хэвисайда в уравнении (8) текста автореферата;
- рекомендация о включении в модель факторов электрохимии;
- замечание относительно опечаток в автореферате и тексте диссертации.

2. Положительный отзыв официального оппонента Фомина Л.В. В отзыве отмечено, что сформулированная связанная модель хемомеханики впервые позволила описать образование слоистой структуры продуктов коррозии при высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии сплавов никель-хром и железо-хром. Модель может быть развита для описания процессов коррозионной повреждаемости, азотирования, цементирования, ионной имплантации и использоваться для других конструкционных сплавов, а также сплавов, применяемых в медицине. Оппонент отмечает следующие замечания:

- вопрос о выборе основной характеристической системы (глава 2) для описания и прогнозирования коррозионного процесса;
- вопрос об определении представительного объёма;
- замечание об отсутствии обоснования выбора типа симметрии при формулировке определяющих соотношений (глава 3);
- вопрос о применимости закона Нортона (глава 3) к моделированию ползучести продуктов коррозии;
- рекомендация о рассмотрении процессов коррозионного разрушения.

3. Положительный отзыв ведущей организации ИГиЛ СО РАН. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой самостоятельную завершённую научно-квалификационную работу, в которой на высоком теоретическом уровне решена важная научная задача механики деформируемого твёрдого тела, заключающаяся в построении замкнутой термодинамически согласованной модели хемомеханики. Разработанный подход может быть использован для оценки остаточной прочности и ресурса деталей газотурбинных двигателей. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- рекомендация о применении модели к задачам с произвольным трёхосным нагружением;
- замечание об обозначении функции Хэвисайда в уравнениях пластичности;
- замечание о дублировании символов в обозначениях;
- замечание о расстановке скобок в уравнениях (3.43), (3.58), (3.61), (3.62);
- замечание относительно опечаток и стиля отдельных утверждений в тексте диссертации.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1. Положительный отзыв от Андрианова И.К., к.т.н., доцента кафедры авиастроения и компьютерного проектирования ФГБОУ ВО "Комсомольский-на-Амуре государственный университет", г. Комсомольск-на-Амуре (3 замечания);
2. Положительный отзыв от Гнеденкова А.С., д.х.н., профессора РАН, главного научного сотрудника лаборатории электрохимических сканирующих и синхротронных методов исследования гетерогенных и гибридных материалов ФГБУН "Институт химии ДВО РАН"; г. Владивосток (3 замечания);
3. Положительный отзыв от Земскова А.В., д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры фундаментальной математики ФГАОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)", г. Москва (4 замечания);
4. Положительный отзыв от Лисовенко Д.С., д.ф.-м.н., члена-корреспондента РАН, заведующего лабораторией механики новых материалов и технологий ФГБУН "Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН", г. Москва (2 замечания);
5. Положительный отзыв от Саченкова О.А., к.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой геометрии и компьютерного моделирования Института математики и механики им. Н.И.Лобачевского ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", г. Казань (2 замечания).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- замечание, связанное с выбором изотропной модели материала;
- замечание об отсутствии оценки вычислительной сложности модели;
- вопрос о природе минимума на графике трансверсальных напряжений (рис. 3);
- вопрос о величинах упругих деформаций и деформаций набухания;
- замечание об обозначении множителей в формулах (7) и (8);
- замечание об отсутствии методов решения начально-краевых задач глав 4 и 5;
- вопрос об определении коэффициентов диффузии;
- замечание, связанное с отсутствием электрохимических эффектов в модели;
- замечание об отсутствии термодинамического расчёта химических реакций;
- замечание, касающееся учёта процессов коррозионной деструкции материала;

- вопрос об определении точки многокомпонентного континуума;
- вопрос, связанный с учётом пористости в модели.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области механики деформируемого твёрдого тела, имеют большое число публикаций с результатами теоретических и экспериментальных работ, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ИГиЛ СО РАН является одним из ведущих научных центров в области исследований прочностных свойств материалов, подверженных воздействию термических и механических нагрузок, в котором активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по многим направлениям механики деформируемого твёрдого тела, связанных с разработкой экспериментальных и вычислительных подходов к описанию физико-механических процессов, вместе с их реализацией к решению проблем наукоёмкого машиностроения. Научные школы ИГиЛ СО РАН поддерживаются грантами ведущих научных фондов и контрактами с промышленными предприятиями. Объектами исследований сотрудников ИГиЛ СО РАН выступают процессы ползучести и упруго-пластического деформирования, реализующиеся при высоких температурах в структурно-неоднородных материалах и конструкциях. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов, обсужден и одобрен на научном семинаре направления «Механика деформируемого твёрдого тела» "Механика макро- и нано-структур" под руководством д.ф.-м.н. С.Н. Коробейникова и д.ф.-м.н. А.В. Шутова 05.10.2026 г. в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана связанная модель хемомеханики, включающая балансовые уравнения, термодинамически согласованные и материально объективные определяющие уравнения взаимной диффузии, химических реакций и упруговязкопластического деформирования многокомпонентного твёрдого тела;

предложено теоретическое обоснование и описание процесса возникновения слоистой структуры продуктов коррозии в ходе высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии сплавов никель-хром и железо-хром;

доказано, что образование слоистой структуры продуктов высокотемпературной солевой коррозии контролируется диффузионными процессами;

введена гипотеза о разделении движения на диффузионную и конвективную составляющие с материальным либо маркерным описанием.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана неэквивалентность моделей механодиффузии с материальным или маркерным описанием диффузии и конвективного движения материала;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы методы механики и термодинамики многокомпонентного деформируемого твердого тела, материально объективные определяющие уравнения упруговязкопластичности, диффузии и химических реакций;

изложен подход к построению уравнений связанных процессов деформирования и диффузии с материальным описанием деформирования и маркерным описанием диффузии;

раскрыты механизмы образования слоистой структуры продуктов высокотемпературной солевой коррозии;

изучено влияние напряжений на кинетику диффузии и химических реакций, влияние геометрически нелинейных эффектов и деформаций ползучести на эволюцию напряжений;

проведена модернизация пакета программ механики упруговязкопластического деформирования в геометрическо-нелинейной постановке, в который добавлены уравнения диффузии и химических реакций компонентов сплава с кислородом и серой с учетом напряжений, а также возникновение собственных деформаций за счет изменения химического состава.

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

разработаны и внедрены для жаропрочных сплавов алгоритмы численного моделирования процессов высокотемпературной солевой коррозии, протекающих с формированием слоистой структуры оксидов и сульфидов компонентов;

определен вклад связанности уравнений механики, диффузии и химических реакций, а также изменения напряженно-деформированного состояния материала в кинетику процесса коррозии;

создана методика моделирования процессов образования слоистой структуры продуктов коррозии и верификации его результатов;

представлены рекомендации для использования модели при теоретическом описании сопряжённых процессов повреждаемости материала, зарождения и развития в нем микротрещин, отслоения продуктов коррозии, питтингового механизма коррозии, биодеградации, азотирования, цементирования, ионной имплантации.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: исследование опирается на независимые данные, полученные на современном экспериментальном оборудовании и опубликованные в ведущих рецензируемых журналах;

теория построена с использованием термодинамически согласованных и материально объективных уравнений связанных процессов взаимной диффузии, химических реакций и деформирования многокомпонентного твёрдого тела для изотропного материала;

идея базируется на комбинации маркерного описания взаимной диффузии и материального описания деформирования;

использовано сравнение, показавшее соответствие эффективных коэффициентов диффузии связанных уравнений механодиффузии в предельных случаях с известными выражениями;
установлена способность модели качественно и количественно описывать экспериментально наблюдаемые толщины, химический состав слоистой структуры и напряжения на поверхности образца от времени и соответствие коэффициентов диффузии независимым экспериментальным данным;
использованы эффективные и апробированные численные методы, реализованные в современных лицензионных пакетах программ.

Личный вклад соискателя состоит в самостоятельном выполнении теоретических выкладок, необходимых для математической постановки задачи, численной реализации, идентификации и верификации модели, проведении численных экспериментов и анализу закономерностей и механизмов исследуемых процессов.

Диссертация соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается: логической структурой, системным характером проведения исследования взаимосвязью выводов с поставленной целью.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи о разработке метода расчёта высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов. Возможность прогнозирования скорости роста поверхностной коррозионной структуры в условиях агрессивных сред и значительных нагрузок связана с разработкой эффективных методов проектирования ответственных деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок, способствующих увеличению их эксплуатационного ресурса.

На заседании 05 ноября 2026 г. диссертационный совет принял решение присудить Дудину Д.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., профессор
Роговой Анатолий Алексеевич _____ / Роговой А.А

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович _____ / Зуев А.Л.

06 ноября 2026 г. М.П.