«УТВЕРЖДАЮ»
И.о. директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской
академии наук
доктор физико-математических наук

_____ Е.М. Рудой
«19» октября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук» на диссертационную работу Дудина Дмитрия Сергеевича «Описание высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов связанными уравнениями хемомеханики», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

1. Актуальность проблемы.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки надёжных методов прогнозирования деградации и оценки ресурса ответственных элементов конструкций, работающих в экстремальных условиях одновременного воздействия высоких температур, значительных механических нагрузок и агрессивных коррозионных сред. Высокотемпературная солевая коррозия металлических сплавов представляет собой сложный связанный процесс, в котором перенос агрессивных веществ и локальные химические реакции протекают в деформируемом материале. Развитие коррозии сопровождается значительным расширением (набуханием), возникновением остаточных механических напряжений и релаксационными процессами ползучести, которые, в свою очередь, кардинально меняют термодинамические потенциалы, кинетику реакций и потоки взаимной диффузии.

Традиционные подходы к моделированию коррозии, основанные исключительно на чисто диффузионных или феноменологических законах, не позволяют адекватно учесть этот взаимный механохимический контакт. В связи с этим построение строгих, термодинамически непротиворечивых связанных математических моделей хемомеханики, способных описывать эволюцию напряжённо-деформированного состояния и кинетику роста

многокомпонентных слоев продуктов коррозии, является важной и актуальной задачей механики деформируемого твёрдого тела.

2. Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и списка литературы из 137 наименований, содержит 169 страниц текста с 37 рисунками и 16 таблицами. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во ***введении*** сформулированы актуальность исследования, цель, задачи и методы исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, апробация, публикации, личный вклад соискателя.

В ***первой главе*** проведен аналитический обзор существующих теоретических и экспериментальных подходов к формулировке связанных уравнений взаимной диффузии и химических реакций в деформируемых сплошных средах. Подробно рассмотрены особенности протекания механохемодиффузионных процессов, проанализирована фундаментальная проблема разделения диффузионного и конвективного движений в связанных уравнениях деформирования, определены границы применимости существующих моделей солевой коррозии и обоснованы задачи диссертационного исследования.

Во ***второй главе*** построены связанные модели взаимной диффузии в деформируемом твёрдом теле с применением различных способов описания движения. Автор вводит и сопоставляет семейства характеристических систем отсчёта (систем наблюдателей), формулирует уравнения баланса, исследует условия молекулярной несжимаемости и баланс импульса в многокомпонентной сплошной среде. На этой основе разработаны замкнутые уравнения взаимной диффузии для вязкоупругих сред.

В ***третьей главе*** разработана общая термодинамически непротиворечивая связанная модель хемомеханики, описывающая процессы взаимной диффузии и скоростей химических реакций в деформируемом твёрдом теле с учётом образования фаз продуктов коррозии. Представлена полная сводка определяющих уравнений как в геометрически нелинейной, так и в геометрически линейной постановках. С привлечением свободной энергии Гельмгольца и термодинамического неравенства Клаузиуса-Дюгема выведены реологические соотношения и кинетические уравнения механохимического взаимодействия.

Четвертая глава посвящена численному моделированию высокотемпературной оксидной коррозии нихрома Ni70Cr30. Сформулирована одномерная постановка краевой задачи хемомеханики, проведена идентификация параметров модели по экспериментальным данным и выполнен детальный анализ расчётных профилей концентраций элементов,

полей механических напряжений и деформаций, а также исследованы закономерности изменения глубины и скорости роста оксидного слоя.

Пятая глава посвящена моделированию процессов сложной высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии сплава Fe76Cr24. В рамках предложенных одномерных гипотез проведён численный расчет кинетики совместного образования нескольких продуктов коррозии (оксидов хрома, железа и сульфида хрома). Исследовано влияние напряжений и эффекта ползучести на релаксацию полей напряжений и существенное замедление продвижения фронта коррозии при больших временах взаимодействия

В ***заключении*** сформулированы основные научные результаты работы и обозначены перспективные направления её дальнейшего развития.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.

Главным теоретическим результатом работы является развитие единого математического аппарата механики сплошных сред — термодинамически согласованной системы связанных уравнений хемомеханики, которая позволяет описывать сопряженные процессы многокомпонентной взаимной диффузии, нелинейного деформирования и кинетики химических реакций с учётом фазового расширения и ползучести реагирующих фаз.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Получены новые расчетные методики и численные алгоритмы, встроенные в современные вычислительные комплексы, позволяющие получать количественную оценку и прогнозирование толщины коррозионных слоев, профилей концентраций элементов и полей остаточных напряжений в металлических сплавах при длительном высокотемпературном воздействии. Разработанный подход может быть использован научно-исследовательскими институтами и конструкторскими бюро авиационного и энергетического машиностроения для оценки остаточной прочности и ресурса деталей ГТД (например, лопаток турбин).

5. Достоверность результатов диссертации.

Достоверность результатов базируется на следовании фундаментальным законам механики сплошных сред, включая законы сохранения массы и импульса, а также принципы феноменологической термодинамики. Кроме того, достоверность опирается на корректное проведение математических выкладок, применение численных методов и тестирование алгоритмов. Достоверность выводов диссертации подтверждается качественным совпадением результатов расчетов распределения фаз и скоростей продвижения фронтов продуктов коррозии с независимыми экспериментальными данными для сплавов Ni70Cr30 и Fe76Cr24, соответствием результатов моделирования экспериментальным данным по остаточным напряжениям, а также апостериорной проверкой коэффициентов диффузии.

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы опубликованы в девяти статьях (6 в рецензируемых журналах и 3 в коллективных монографиях по механике деформируемого твёрдого тела; 7 из них реферируются международными базами цитирования, а 3 входят в список журналов, рекомендованных ВАК для публикаций результатов диссертаций на соискание степеней по физматнаукам по специальности 1.1.8 - Механика деформируемого твёрдого тела), и докладывалась на двадцати пяти всероссийских и международных конференциях и семинарах по профилю механики деформируемого твёрдого тела. Работа выполнялась в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН и крупного научного проекта Минобрнауки России, результаты которых проходят полноценную научную экспертизу.

7. Замечания и вопросы по содержанию работы.

1. Несмотря на то, что в третьей главе построена тензорная модель упруговязкопластического деформирования (обобщение тензорной модели Simo-Miehe), в численных расчётах применяется её более простой одномерный аналог. Работа с полноценными тензорными моделями, пригодными для произвольного трёхосного нагружения, позволила бы расширить область возможных применений теории.

2. При формулировке уравнений пластичности применяется функция $h(\mathbf{s})$, которая ошибочно названа функцией Хэвисайда. По существу, это функция активации пластического течения.

3. В работе имеется коллизия обозначений. Символ $\mathbf{F}_*$ используется для обозначения объёмной внутренней силы (уравнение (2.27)), производной от внутренней энергии (уравнение (2.51)), а также для отдельных частей тензора градиента деформаций $\mathbf{F}$. Такое дублирование символов усложняет восприятие громоздких хемомеханических уравнений.

4. В ряде тензорных вычислений необходимо расставить скобки для задания правильного порядка операций (уравнения (3.43), (3.58), (3.61), (3.62)).

5. В работе содержатся единичные опечатки и отдельные утверждения, сформулированные в разговорном стиле, например: «С учётом всего этого получаем локальную форму термодинамического неравенства…».

Сформулированные замечания не снижают общей ценности работы и не ставят под сомнения положения, выносимые на защиту.

8. Заключение по диссертации.

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 замкнутых термодинамически согласованных моделей хемомеханики. Диссертация обладает внутренним единством. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.1.8 (Механика деформируемого твёрдого тела): пункт 2 –

«теория определяющих соотношений деформируемых тел с простой и сложной структурой», пункт 3 – «задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости», пункт 7 – «механохимия, теория структурных и фазовых переходов в твёрдых телах», пункт 11 – «математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях», пункт 12 – «вычислительная механика деформируемого твёрдого тела». Диссертационная работа Дудина Дмитрия Сергеевича «Описание высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов связанными уравнениями хемомеханики» выполнена на высоком научно-методическом уровне и отвечает всем требованиям п.9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.03.2013 года (в редакции от 28.08.2017 года), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Отзыв на диссертацию рассмотрен 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 5 октября 2026 года.

Отзыв подготовил:
г.н.с. Лаборатории механики композитов ИГиЛ СО РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04)

Шутов Алексей Валерьевич

Подпись Шутова А.В. заверяю
Врио ученого секретаря ИГиЛ СО РАН
к.ф.-м.н. Батяев Е.А.

12.10.2026.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГиЛ СО РАН), г. Новосибирск.
Служебный телефон: +7 (383) 333-16-12, E-mail: igil@hydro.nsc.ru
Служебный адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 15