

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Дудина Дмитрия Сергеевича «Описание высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов связанными уравнениями хемомеханики», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

1. Актуальность темы исследования.

Современные ответственные конструкции и их элементы часто работают в условиях воздействия на них внешних и/или рабочих сред. Деструктивное влияние такого воздействия на материалы конструкций существенно усиливается в условиях повышенных температур и действия нестационарных нагрузок. Агрессивные компоненты среды (например, водород, кислород, сернистые соединения, соли) вызывают коррозионные повреждения, эрозию, растрескивание. В частности, применительно к газотурбинным двигателям происходят обеднение поверхностного слоя легирующими элементами и коррозионные повреждения. Высокотемпературная коррозия сопровождается взаимной диффузией компонентов сплава и агрессивных веществ, химическими реакциями, ростом деформаций, возникновение и релаксацией вызванных ими напряжений. В связи с этим для адекватного моделирования таких процессов, прогнозирования коррозионной стойкости материалов элементов конструкций требуется разрабатывать модели хемомеханики именно в связанной постановке. Исследование и моделирование таких взаимосвязанных процессов, несомненно, актуально для обеспечения безопасной работы конструкций в течение всего срока их эксплуатации. Данная диссертационная работа посвящена разработке и применению модели хемомеханики в связанной постановке для описания высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов.

2. Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 169 страниц, включая 37 рисунков и 16 таблиц. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во *введении* сформулированы актуальность работы, цели и задачи исследования, отмечены степень разработанности темы диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость,

методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, их достоверность, апробация результатов исследования, личный вклад автора, публикации, благодарности.

В *первой главе* приводится обзор работ и выделяются подходы, описывающие построение связанных моделей взаимной диффузии и химических реакций в многокомпонентных деформируемых средах, а также обосновывается необходимость таких моделей для описания высокотемпературной оксидной и сульфидной коррозии металлических сплавов. По результатам проведенного обзора автор диссертационной работы делает выводы о необходимости постановки термодинамически согласованных связанных уравнений взаимной диффузии и химической реакции в упруговязкопластическом многокомпонентном твердом теле, причем отмечается важность и необходимость учета конечных деформаций. Автором отмечается экспериментальный факт о наличии слоистой структуры продуктов высокотемпературной солевой коррозии с различным химическим составом слоев, однако теоретического описания этого явления, по мнению автора, не обнаружено. Сочетания материального описания деформирования твердого тела и маркерного описания взаимной диффузии при построении связанных моделей также не обнаружено. На основе проведенного обзора формулируются цели и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава состоит из трех частей и в общем посвящена сравнению связанных моделей взаимной диффузии в деформируемом твердом теле с различными способами разделения деформационного и диффузионного движений.

В первой части главы обсуждаются характеристические системы отсчета, возможности их использования в связанных уравнениях взаимной диффузии и деформирования. Автором рассматриваются три семейства различных характеристических систем. Описание диффузии в связанных системах при этом производится двумя способами: материальное, которое отождествлено с сохранением характеристик среды в локальном объеме, и маркерное, при котором характеристическая система движется вместе с маркерами – инертными частицами, которые диффузионно и химически не взаимодействуют с компонентами материала в деформируемом твердом теле.

Во второй части главы вводятся термодинамически согласованные связанные модели взаимной диффузии и упруго вязкого деформирования твердого тела. В геометрически линейной постановке рассматриваются две связанные модели, в которых применяется материальное и комбинированное описание диффузии и деформирования. Реологическая модель учитывает объемные упругие деформации и деформации, связанные с изменением

химического состава материального объема. Для связи девиаторных частей тензоров напряжения Коши и линейных деформаций применяется модель стандартного линейного тела. Объемные части тензоров напряжений и деформаций связываются упруго.

В третьей части главы автором проводится анализ времен релаксации малых возмущений равновесного состояния связанных моделей взаимной диффузии и вязкоупругого деформирования. На графиках зависимостей времен релаксации от длин волн наблюдаются наклонные асимптоты, которые определяются эффективным коэффициентом диффузии. Показано, что при стремлении длины волны к нулю, вязкие свойства не оказывают влияние на эффективный коэффициент диффузии, но зависимость от упругих свойств остается. При бесконечно больших длинах волн имеет место слабое влияние упруго-вязких свойств на эффективный коэффициент диффузии.

В *третьей главе* сформулирована связанная модель хемомеханики, сочетающая в себе взаимосвязь диффузии и химических реакций агрессивных веществ в деформируемом твердом теле с его упруговязкопластическим деформированием. Автором на базе классической термодинамики необратимых процессов вводятся уравнения баланса массы, диффузионные потоки и скорости химических реакций. При этом диффузионные потоки зависят от градиента среднего напряжения, скорости реакций зависят от величины среднего напряжения, что по мнению рецензента вполне адекватно как с физико-химической, так и с механической точек зрения. Построена реологическая модель конечных упруговязкопластических деформаций и деформаций набухания. В данной модели учтены упругая, вязкопластическая составляющие и составляющая, моделирующая набухание. Автор использует степенные законы для описания деформационного и скоростного упрочнений. Рассматриваемые уравнения модели дополняются уравнениями равновесия, зависимостями параметров модели от переменных состава, законом Гука, а также начальными и граничными условиями.

В *четвертой главе* рассмотрен процесс высокотемпературного окисления никель-хромового сплава в процессе его деформирования. С помощью разработанной связанной модели автор исследует экспериментально наблюдаемый процесс образования слоистой структуры в процессе окисления: образования слоя оксида хрома и зону химической реакции, в которой идут процессы взаимной диффузии всех участвующих компонентов. В результате автором показано влияние геометрической нелинейности, ползучести и конвективного массопереноса на результаты расчета процессов окисления. В процессе стесненного деформирования материал испытывает трансверсальные сжимающие напряжения и в результате появляются существенные продольные деформации, что

обосновывает применение геометрически нелинейной модели с конечными деформациями. Учет связанности процессов взаимной диффузии и деформирования замедляет скорость роста слоя оксида хрома.

Пятая глава посвящена исследованию связанных процессов взаимной диффузии, химических реакций и деформирования в ходе высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии железо-хромистого сплава с образование слоистой структуры: двух слоев при окислении и трех слоев при сульфидно-оксидной коррозии. Автор применяет построенную связанную модель хемомеханики. В ходе коррозионных процессов реализуются большие растягивающие продольные деформации, большую часть из которых составляют вязкопластические деформации. Учет вязких свойств позволяет напряжениям релаксировать со временем, что приводит к смещению максимальных напряжений вглубь материала. Коррозионный процесс разделяется на две стадии. На первой стадии происходит образование слоев и скорость продвижения продуктов коррозии контролируется скоростью химических реакции. На второй стадии при больших временах скорость продвижения продуктов коррозии стремится к асимптоте, данный процесс контролируется диффузионными процессами. Также автором показано, что конвективный массоперенос (в процессе деформирования) замедляет продвижение продуктов коррозии.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.

В результате диссертационного исследования разработана связанная модель хемомеханики, в которой сочетаются материальный и маркерный подходы для описания диффузии и химических реакций в деформируемом твердом теле в условиях существенном изменении химических компонентов во времени и пространстве. Установлена неэквивалентность моделей с материальным или маркерным описанием диффузии и конвективного движения материала. Получены связанные и темодинамически согласованные уравнения модели, которые объединяют взаимную диффузию, химические реакции и упруговязкопластическое деформирование многокомпонентного твердого тела в геометрически нелинейной постановке.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Применение разработанной модели хемомеханики впервые позволило описать образование слоистой структуры продуктов коррозии в процессе высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии никель-хром и железо-хром сплавов.

Разработанная модель хемомеханики может быть развита для теоретического описания ряда родственных процессов. Здесь следует отметить возможность моделирование сопряжённых процессов повреждаемости, зарождения развития микротрещин, отслоение слоя продуктов коррозии, питтингового механизма коррозии. Практическая применимость прослеживается для описания солевой высокотемпературной коррозии других конструкционных сплавов, а также сплавов, применяемых в медицине. В задачах технологической модификации и упрочения поверхности при азотировании, цементировании, ионной имплантации актуальность применения разработанной связанной модели, несомненна.

5. Достоверность результатов диссертации.

Достоверность результатов обеспечивается термодинамически согласованными и материально объективными уравнениями связанных процессов взаимной диффузии, химических реакций и деформирования многокомпонентного твёрдого тела для изотропного материала. Кроме этого, описание взаимной диффузии компонентов металлического сплава относительно маркеров является общепринятым в физике металлов и определяется базовыми экспериментами. Используются общепринятые подходы механики деформируемого твердого тела, в частности, применяется геометрически нелинейная формулировка уравнений для описания больших деформаций материала коррозионных слоёв. В уравнениях учтены вязкопластические деформаций при моделировании экспериментально наблюдаемой релаксации остаточных напряжений при росте коррозионного слоя.

6. Апробация работы.

Основные научные результаты диссертационной работы Дудина Д.С. отражены в 9 статьях (6 в рецензируемых журналах и 3 в коллективных монографиях по механике деформируемого твёрдого тела, 6 из которых реферируются международными базами цитирования, а 3 входят в список ВАК). В дополнение к указанным публикациям результаты докладывались на 5 международных и 15 всероссийских конференциях, а также на ведущих научных семинарах по профилю механики деформируемого твердого тела.

7. Замечания и вопросы по содержанию работы.

1. В сложном многоэтапном диффузионно-коррозионном процессе, происходящем в реологически деформируемом твердом теле, определяющую роль будут играть характерные времена каждой из составляющих процесса на рассматриваемом временном этапе взаимодействия коррозионно-активной среды с материалом. По мнению рецензента для получения адекватного результата

разрешающие системы уравнений должны быть записаны в едином безразмерном времени, нормированном относительно одного из характерных времен. В предлагаемом диссертационном исследовании автор вводит различные характеристические системы координат. Время движения каждой из указанных систем относительно глобальной системы, в общем, можно принять за характерное время. Движение какой из характеристических систем можно принять как основное (с основным характерным временем) для описания и прогнозирования связанного с деформированием диффузионно-коррозионного процесса?

2. В механике деформируемого твердого тела базовым является понятие представительного объема, выбор которого для каждого рассматриваемого уровня (или этапа) может быть различным. Построение определяющих соотношений среды зависит от данного выбора. В п.2.1.5 диссертации автор отмечает, что рассматривается материальный объем, непрерывно заполненного парциальными объемами компонента. Судя по такой формулировке, в этот объем входят только диффундирующие продукты коррозии, без структурных элементов основного металла. Какой представительный объем рассматривается в диссертации? Меняется ли он в зависимости от рассматриваемого этапа (диффузия, химическая реакция)?
3. Рецензент не обнаружил в тексте диссертационной работы обоснование выбора изотропности или анизотропности применяемых определяющих соотношений металлического материала и/или продуктов коррозии. Какое-то пояснение по этому вопросу желательно дать.
4. При построении определяющих соотношений применяется степенной закон ползучести Нортона. На деформирование какого представительного объема этот закон распространяется? Насколько это применимо для моделирования ползучести продуктов коррозии?
5. Высокотемпературное окисление и коррозия, как правило, приводят к разрушению: локальному, послойному, глобальному. В данной диссертационной работе эта проблематика не рассматривается. Рецензент в качестве рекомендации предлагает соискателю обратить на это внимание в дальнейших своих исследованиях.

Указанные вопросы и замечания не ставят под сомнение полученные соискателем ученой степени результаты, не снижают научной ценности проведенного исследования и не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы.

8. Заключение по диссертации.

Диссертация представляет собой самостоятельную завершённую научно-квалификационную работу, в которой разработана связанная модель хемомеханики, которая применена для описания высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов. Модель сочетает в себе взаимосвязь диффузии и химических реакций агрессивных веществ в деформируемом твёрдом теле с его упруговязкопластическим деформированием.

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 ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 18.03.2023 года), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела.

Заведующий лабораторией проектирования и прикладных методов расчета композитных конструкций Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ),

кандидат физико-математических наук

28.09.2026

Фомин Леонид Викторович

Служебный телефон: 8(495) 939-24-28

Email: fleonid1975@mail.ru

Служебный адрес: 119192 г. Москва, Мичуринский проспект, д.1. НИИ механики МГУ

Подпись Фомина Л.В. заверяю:

И.о. директора НИИ механики МГУ



/ Д.В. Георгиевский /

28.09.2026