

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Дудина Дмитрия Сергеевича
«Описание высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов
связанными уравнениями хемомеханики», представленную к защите
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

1. Актуальность и практическая значимость работы

Теоретические исследования процессов высокотемпературной солевой коррозии сплавов важны для понимания процессов, протекающих при эксплуатации нагруженных ответственных деталей газотурбинного двигателя большой тяги в условиях повышения рабочих температур и нагрузок двигателя. Высокотемпературная солевая коррозия сопровождается взаимной диффузией компонентов сплава и агрессивных веществ, химическими реакциями, ростом деформаций, возникновением и релаксацией вызванных ими напряжений. Поэтому для прогнозирования коррозионной стойкости сплава требуется связанная модель хемомеханики, учитывающая особенности процесса. Этим обусловлены актуальность и практическая значимость данной работы.

2. Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в получении результатов исследования влияния связанности диффузионно-реакционной и деформационной составляющих процесса, обобщении модели на геометрически нелинейный случай, учете неупругих деформаций; в применении развитой модели для теоретического описания процессов высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии жаропрочных металлических сплавов никель-хром и железо-хром, в том числе для изучения роли напряжений, их релаксации и геометрически нелинейных эффектов.

3. Научная новизна работы

В работе сформулированы новые термодинамически согласованные и материально объективные определяющие уравнения связанных процессов взаимной диффузии и химических реакций в упруговязкопластическом многокомпонентном твёрдом теле в геометрически нелинейной постановке.

Впервые в связанной модели диффузии, реакций и деформаций многокомпонентного твердого тела совместно применены подходы: материальный – естественный для описания деформирования твёрдого тела и маркерный –

естественный для описания взаимной диффузии компонентов металлического сплава в условиях существенного изменения химического состава. Подчеркнута важность использования в связанных моделях механодиффузии гипотезы о разделении движения на диффузионную и конвективную составляющие.

4. Оценка достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечена использованием термодинамически согласованных и материально объективных уравнений; асимптотическим соответствием полученных аналитических выражений эффективных коэффициентов диффузии известным выражениям, отвечающим простым структурным моделям; сходимостью численного расчёта при измельчении конечно-элементной сетки; верификацией используемых коэффициентов диффузии на основе имеющихся в литературе независимых экспериментальных данных.

Значимость работы подтверждена также тем, что она выполнялась в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН и крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России.

5. Обзор содержания и результатов диссертационной работы

Диссертация имеет логичную структуру и включает введение, пять глав основного содержания, заключение, список литературы из 138 наименований и изложена на 169 страницах.

Во **введении** сформулированы актуальность и степень разработанности темы диссертации, цели и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность, даны сведения об апробации, публикации основных результатов работы и личном вкладе соискателя.

В **первой главе** приведен обзор подходов к построению связанных моделей взаимной диффузии и химических реакций многокомпонентных деформируемых сред и обоснование необходимости таких моделей для описания высокотемпературной оксидной и сульфидной коррозии металлических сплавов. Классифицированы модели коррозионной повреждаемости: инженерные, описывающие рост толщины коррозионного слоя и сопутствующие процессы ползучести и накопления повреждений, модели, использующие метод фазового поля и описывающий рост локальных коррозионных повреждений, электрохимические и химические. Сделан вывод, что высокотемпературная оксидная и солевая коррозия может быть описана в рамках хемодиффузионного

подхода без введения явных границ между слоями продуктов коррозии и границы между продуктами коррозии и металлом.

Вторая глава посвящена сравнению связанных моделей взаимной диффузии в деформируемом твёрдом теле, различающихся способами разделения деформационного и диффузионного движений. Сформулированы термодинамически согласованные связанные уравнения механодиффузии. Отмечены различные подходы к описанию диффузии в сочетании с различными подходами к описанию конвективного движения материала. Для качественного сравнения моделей рассмотрена одномерная задача исследования релаксации малых возмущений равновесного состояния трехкомпонентной среды.

Третья глава посвящена формулировке связанной модели взаимной диффузии и химических реакций в упруговязкопластическом твёрдом теле, основанной на комбинированном подходе к описанию взаимной диффузии и деформирования, сочетающим материальное описание деформирования твёрдого тела и маркерное описание взаимной диффузии компонентов сплава в условиях изменения химического состава. Построена реологическая модель конечных упруговязкопластических деформаций и деформаций набухания, обобщающая упругопластическую модель Simo – Miehe, в которой градиент деформаций мультипликативно раскладывается на упругую и вязкопластическую составляющие и деформацию набухания за счет изменения локального химического состава. При формулировке определяющих уравнений применяется подход термодинамики необратимых процессов. При описании диффузии компонент использован единый тензор напряжений, зависящий от истории деформирования и химического состава.

Четвёртая глава посвящена теоретическому исследованию связанных процессов взаимной диффузии, химических реакций и деформирования в ходе высокотемпературного окисления сплава $\text{Ni}_{70}\text{Cr}_{30}$. Поставлена соответствующая одномерная задача. Модель идентифицирована по данным эксперимента и включает четыре компонента — диффундирующие O_2 , Ni, Cr и неподвижный Cr_2O_3 . Модель описывает экспериментально наблюдаемое образование слоя оксида хрома и зону химической реакции, в которой происходит взаимная диффузия всех компонентов, причём O_2 и Cr_2O_3 движутся вглубь материала, а Ni и Cr навстречу им, и происходит окисление. Исследовано влияние геометрической нелинейности, ползучести и конвективного массопереноса на результаты расчёта. Учёт вязких свойств смещает максимальные сжимающие напряжения вглубь материала. Обоснована необходимость использования геометрически нелинейной формулировки. Показано, что учёт связанности процессов взаимной диффузии и

деформирования замедляет скорость роста оксида хрома, что объясняется разнотемпературностью диффузионного и конвективного движений. Показано, что влияние напряжений на диффузионные потоки и скорость химической реакции приводит к замедлению продвижения оксида.

Пятая глава посвящена теоретическому исследованию связанных процессов взаимной диффузии, химических реакций и деформирования в ходе высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии сплава $\text{Fe}_{76}\text{Cr}_{24}$. Модель опирается на данные эксперимента и включает пять компонент — диффундирующие O_2 , Fe, Cr и неподвижные Fe_2O_3 , Cr_2O_3 в случае оксидной коррозии и дополнительно диффундирующую S_2 и неподвижную Cr_2S_3 в случае сульфидно-оксидной коррозии. Модель описывает образование двух оксидных слоёв (оксид хрома под оксидом железа) при окислении и трёх слоёв продуктов коррозии (сульфид хрома под оксидом хрома и оксидом железа) при сульфидно-оксидной коррозии. Подобранные для соответствия экспериментальным данным по химическому составу и толщинам слоев в последовательные моменты времени парциальные коэффициенты диффузии соответствуют порядку величины экспериментальных значений коэффициентов диффузии из справочной литературы. Также исследована роль каждого из факторов (связанность, геометрическая нелинейность и реологическая компонента деформации).

В заключении сформулированы основные выводы и перспективы развития исследования.

6. Апробация и публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в девяти статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых международными базами цитирования, а также в коллективных монографиях по механике деформируемого твердого тела, индексируемых в Scopus. Результаты работы докладывались на трех десятках всероссийских и международных конференциях и семинарах по механике деформируемого твердого тела и механике перспективных материалов, что свидетельствует о хорошей апробации полученных результатов.

7. Замечания и комментарии по диссертации и автореферату

1. Автор неоднократно упоминает слоистую структуру продуктов коррозии, но в модели слоистая структура, как структура, состоящая из слоев, разделенных границами, не описывается, о чем автор пишет уже в первой главе. Это позволяет автору избежать введения и учета условий на границах раздела. Вместо слоев с границами раздела рассматривается коррозионная зона с неоднородно распределенным по толщине материалом. В связи с этим систематическое упоминание слоистых структур и слоев может приводить к недопониманию.

2. При описании моделей диффузии, использующих различные системы отсчета, автор не упоминает так называемую Лагранжеву диффузию, когда движение диффундирующих частиц «проецируется» на отсчетную конфигурацию с помощью градиента деформации (см., напр., упомянутую в списке литературы монографию K. Wilmanski). Был бы уместен критический комментарий по поводу возможности и целесообразности или нецелесообразности пересчета модели, развиваемой автором диссертации, в терминах Лагранжевой диффузии.

3. Автор сосредотачивается на описании влияния механических напряжений на диффузию. Что касается скорости химической реакции, то напряжения в развиваемых моделях влияют на нее только через гидростатическую составляющую (см. формулу (3.74)). Есть ли основания считать, что девиатор тензора напряжений не влияет на скорость реакции при том, что свободная энергия Гельмгольца твердых компонентов реакции зависит от девиаторных составляющих напряжений и деформаций?

4. Для меня осталось неясным, допускает ли модель, развиваемая автором, полное блокирование химического превращения механическими напряжениями, и если допускает, то за счет блокирования диффузионного потока или/и за счет уменьшения собственно скорости химической реакции?

5. При определении напряжений в реологической модели учитывается возможность ползучести. Автор уделяет большое внимание взаимосвязям химических превращений и зависящего от напряжений диффузионного потока. Но диффузия является также механизмом ползучести. Связаны ли процессы диффузии, определяющие химические превращения, и процессы диффузии, являющиеся механизмом ползучести?

6. В газотурбинных двигателях важным объектом, подверженным коррозии, являются лопатки, которые имеют защитные керамические покрытия с другими механизмами коррозии по сравнению с рассмотренными в диссертации. Было бы уместным указать более конкретно, о каких ответственных деталях двигателя, подверженных коррозии, идет речь.

7. В автореферате указана функция Хэвисайда от тензора $h(s)$ в уравнении (8) без пояснений. Пояснения даны в тексте диссертации (уравнение 3.64). Следовало бы повторить это пояснение и в автореферате.

8. В качестве пожелания для дальнейшего развития работы может быть предложено явное включение в модель факторов электрохимии, в том числе тех, о которых говорится в первой главе.

9. Автор почему-то не склоняет слово моль и пишет в автореферате и в диссертации «количество моль компонентов» вместо «молей компонентов».

Эти замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы и указывают на возможные направления её дальнейшего развития или имеют стилистический характер. Работа в целом хорошо написана, ее интересно читать.

Автореферат написан согласно требованиям ВАК и адекватно отражает содержание диссертационной работы.

8. Заключение

Диссертационная работа Дудина Дмитрия Сергеевича «Описание высокотемпературной солевой коррозии металлических сплавов связанными уравнениями хемомеханики» представляет собой законченное научно-квалификационное исследование, имеющее ценность для прогнозирования связанных диффузионных, химических и деформационных процессов жаропрочных сплавов в условиях эксплуатации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела». Совокупность полученных автором результатов обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, а сами результаты достоверны и обоснованы.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением

правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с учётом последующих изменений), предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автор диссертационной работы, Дудин Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твёрдого тела».

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией математических методов
механики материалов, главный научный сотрудник
ФГБУН «Институт проблем машиноведения Российской академии наук»,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела,
старший научный сотрудник

Фрейдин Александр Борисович

19.10.2026

Адрес:

199178, Санкт-Петербург, Большой проспект Васильевского острова, д. 61,
Институт проблем машиноведения РАН,

Тел.: +7 (921) 349-78-49

E-mail: alexander.freidin@gmail.com



Фрейдина А.Б.

ПОМОЩНИК ДИРЕКТОРА

С.И. Андреева

20 26 г.