

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Фроловой Ксении Петровны на тему «Анализ влияния микроструктуры деформируемого тела на характеристики массопереноса», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – механика деформируемого твердого тела

1. Актуальность проблемы.

Разработка адекватных моделей, последовательно учитывающих влияние микроструктуры материала на процессы массопереноса, является актуальной фундаментальной проблемой. В частности, представляет большой научный интерес исследование особенностей насыщения веществом из внешней среды приповерхностной области нагруженного тела. Подобная тема имеет большое прикладное значение для прогнозирования ресурса конструкций, находящихся во взаимодействующей с ней или даже агрессивной атмосфере в условиях эксплуатации. Тема затрагивает целый ряд других сопутствующих проблем на стыке механики и физики металлов. В частности, известно о существенной интенсификации процесса диффузии сквозь границы раздела фаз или вдоль этих границ, однако общепринятых подтвержденных экспериментом моделей этих явления не существует. Описание физики и механики в приповерхностном слое твердого тела при взаимодействии с окружающей атмосферой также представляется довольно сложным. Растрескивание материала приповерхностного слоя наделяет его микроструктурой, которая изменяет эффективные диффузионные и упругие свойства и, независимо, порождает источник концентрации напряжений на границе тела. Все эти обстоятельства необходимо учитывать совместно в рамках связанной постановки, поскольку априори невозможно исключить сценарий взаимного усиления этих эффектов. Данная диссертационная работа как раз и нацелена на изучение влияния микроструктуры пористого/трещиноватого тела на особенности формирования приграничного профиля концентрации примеси, внесенной из внешней среды, с учетом всех возможных механизмов.

2. Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 174 наименований, содержит 198 страниц текста с 34 рисунками и 5 таблицами. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, выполнен анализ разработанности темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследования и отмечена теоретическая и практическая значимость и научная новизна результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов, указан личный вклад в работу, ее апробация и опубликованность.

В **первой главе** определяется эффективный тензор диффузии пористого материала с учетом сегрегации (скачка концентрации примеси на границах пор). Для единичной сфероидальной неоднородности (в частности, поры) в матрице получено аналитическое выражение для тензора вклада в возмущение тензора диффузии с учетом коэффициента сегрегации, отношения длин полуосей сфероида и отношения коэффициентов диффузии примеси в неоднородности и материале матрицы. Найдено соотношение подобия, позволяющее связывать полученные результаты с известными выражениями тензоров эффективных свойств для сфероидальной неоднородности с идеальным контактом (без скачка поля, что, например, имеет место для тепло- и электропроводности). Получены аналитические выражения осесимметричного эффективного тензора диффузии материала, содержащего сфероидальные неоднородности с заданной объемной долей и статистически распределенной ориентацией их осей, а также двухсторонние оценки главных значений этого тензора, с учетом коэффициента сегрегации. Показано, что из ряда схем осреднения в рамках метода эффективного поля только схема Мори – Танака дает результат, не нарушающий оценок при произвольной ориентации сфероидальных пор. Показано, что увеличение

скачка концентрации ведет к пропорциональному (в первом приближении) росту главных значений тензора эффективных диффузионных свойств и увеличивает чувствительность рассматриваемых свойств к отношению полуосей (форме) сфероида. Полученные аналитические результаты верифицированы сведением к известным частным случаям предельными переходами. Для рассматриваемой среды получены выражения для эффективных упругих модулей и установлены точные и приближенные перекрестные соотношения между эффективными упругими и диффузионными свойствами. Исследованы границы применимости приближенных перекрестных соотношений на всем интервале изменения параметра сегрегации и других параметров рассматриваемой пористой среды. Перекрестные соотношения позволяют связать между собой механические характеристики, надежно определяемые из испытаний, и диффузионные, для которых требуется трудоемкий эксперимент (в частности, для нахождения коэффициента сегрегации). Полученное в настоящей главе обобщение методов определения эффективных диффузионных свойств трансверсально-изотропного пористого материала с учетом сегрегации представляет собой необходимый инструментарий для исследования различных проблем массопереноса в теле с микроструктурой и имеет научную новизну.

Во *второй главе* определяется напряженно-деформированное состояние в стандартном образце, используемом в экспериментах по насыщению водородом, — длинном упругом цилиндре, с учетом микроструктуры. Для учета структурной неоднородности материала, связанной с пористостью, его механическое поведение описывается упругим континуумом Коссера. Данный подход представляется приемлемым, поскольку позволяет учесть граничную концентрацию напряжений при растяжении структурно неоднородного цилиндра, описывая при этом его упругие свойства эффективными модулями. Подобный погранслои

появляется в решении задачи растяжения упругого цилиндра в стохастической постановке (В. А. Ломакин). Записаны уравнения равновесия задачи, для которой выделены две упругие характеристики — безразмерный коэффициент связности и характерный масштаб микроструктуры, для которых сделаны оценки. Для существования решения в виде погранслоя на границе цилиндра необходимо задать ненулевые значения микровращения и/или момента-пары. Это может выглядеть искусственным, но подобное нетривиальное граничное условие появляется и в стохастической постановке задачи для структурно-неоднородного упругого материала. Для представления решения типа погранслоя получено асимптотическое решение рассматриваемой задачи. Выполнена оценка толщины приповерхностного слоя материала, в котором происходит пластическое течение материала при упругом растяжении цилиндра, которая оказалась порядка характерного масштаба микроструктуры. Для этого использованы различные обобщения критерия текучести Мизеса, учитывающие моментные напряжения.

В *третьей главе* моделируется диффузия в прилегающем к границе цилиндра слое пористого материала с учетом влияния микроструктуры, как через эффективные диффузионные и упругие свойства, так и посредством погранслоя упругих напряжений и деформаций. Рассмотрена связанная задача диффузии и массоупругости (в рамках классической теории) для не несущего осевой нагрузки длинного цилиндра с заданной концентрацией примеси на его границе. Учитывалась диффузия вследствие градиента концентрации примеси и градиента гидростатического давления (бародиффузии), возникающего из-за накопления примеси. Исследована зависимость распределения концентрации примеси после 50 ч выдержки от микроструктурных параметров и параметра сегрегации, а также с учетом растрескивания, для чего объемная доля трещин связывалась с локальной концентрацией примеси. Во всех приближениях учет микроструктуры увеличивает глубину (полумаксимум концентрации) погранслоя.

Приповерхностная диффузия также исследовалась с помощью связанных уравнений диффузии и массопругости с учетом влияния напряженно-деформированного состояния материала, определяемого в рамках микрополярной теории (то есть с учетом микроструктуры). Это влияние независимо учитывалось через коэффициент диффузии и химический потенциал, причем в последнем случае зависимость выводилась через тензор энергии-импульса Эшелби. Следует отметить, что оба механизма предусматривают влияние на массоперенос касательных напряжений и сдвиговых деформаций, и полевые уравнения оказываются существенно нелинейными. Концентрационные профили через 96 ч выдержки цилиндра без осевой нагрузки в среде примеси, рассчитанные с учетом напряжений, вызванных микроструктурой, обнаруживают качественные особенности. Учет влияния напряженно-деформированного состояния через коэффициент диффузии приводит к появлению перегиба концентрационного профиля вблизи поверхности, а учет влияния напряженно-деформированного состояния через химический потенциал приводит к появлению максимума концентрационного профиля вблизи поверхности. Последнее может объяснять зарождение микротрещин под поверхностью металла при его насыщении водородом.

В *заключении* сформулированы научные результаты работы и сделаны основные выводы.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.

Методы эффективного поля обобщены для вывода эффективных диффузионных свойств матричного композита с трансверсально-изотропной симметрией с учетом сегрегации переносимого вещества на межфазных границах. Сегрегация учтена на всех этапах решения задачи гомогенизации. Получены перекрестные соотношения между эффективными упругими и диффузионными свойствами материала с учетом сегрегации. Оценена применимость четырех наиболее употребимых схем осреднения в рамках

метода эффективного поля. Полученные результаты в большинстве своем являются новыми и дают инструментарий для исследования связанных либо не связанных задач массопереноса в упругом теле с микроструктурой.

Исследована роль концентрации касательных напряжений и сдвиговых деформаций вблизи границы тела с микроструктурой на качественные и количественные характеристики концентрационного профиля вблизи границы тела. Для учета влияния структурной неоднородности упругого тела на формирование погранслоя напряжений и деформаций использовано представление такого тела микрополярным континуумом. При этом исследован вклад каждого из механизмов: классической диффузии, бародиффузии за счет массоупругости и напряжений, обусловленных микроструктурой, а также нелинейные механизмы влияния на диффузию касательных напряжений и сдвиговых деформаций, обусловленных микроструктурой, через химический потенциал и коэффициент диффузии. Также исследовано, как каждый из факторов, определяющий эффективные диффузионные и упругие свойства, влияет на характеристики концентрационного профиля вблизи границы тела. Описанное теоретически в работе смещение максимума концентрации примеси вглубь под поверхность и данное объяснение представляет механизм реально наблюдаемого эффекта. Подобная постановка задачи рассмотрена впервые, а ее всесторонний анализ полезен для дальнейшего развития исследований.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Выполненные фундаментальные исследования вдохновлены проблемой водородной деградации металлических конструкций в условиях эксплуатации. Все численные результаты в работе получены с конкретными значениями, оцененными по данным экспериментов с атмосферостойкой сталью, алюминием и цинк-никелевым сплавом. Общность подходов позволяет применять полученные в работе результаты для исследования явлений массопереноса в других структурно-неоднородных материалах.

Отдельно отметим практическую значимость перекрестных соотношений между модулями упругости и коэффициентом диффузии изотропного пористого материала для обработки экспериментов по диффузии.

5. Достоверность результатов диссертации.

Полученные в работе точные либо приближенные аналитические выражения проверены сведением к существующим результатам в асимптотических случаях. Для получения результатов применялись несколько методов, результаты сопоставлялись друг с другом, с двухсторонними оценками, привлекались перекрестные соотношения между упругими и диффузионными эффективными свойствами. Также стоит отметить довольно элегантные формулировки моделей и тестовых задач, позволяющие исследовать роль каждого фактора, влияющего на результат, по отдельности.

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы К.П. Фроловой опубликованы в трех научных журналах из перечня ВАК и пяти научных журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, и докладывалась на девяти международных и всероссийских научных конференциях по профилю механики деформируемого твердого тела. Полностью работа докладывалась на трех профильных научных семинарах с присутствием членов диссертационных советов по механике деформируемого твердого тела. Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ, результаты которых проходят полноценную научную экспертизу.

7. Замечания по содержанию работы.

1. Параметрическая зависимость от температуры в рассматриваемых изотермических условиях, если бы она учитывалась, по-разному влияла бы на различные механизмы диффузии в связанной постановке. Это дает возможности независимой оценки роли этих механизмов и тех эффектов на концентрационном профиле, которые с ними связываются.

2. Микрополярная среда, вероятно, является не самой подходящей моделью континуума с микроструктурой из обобщенных континуумов. Связь уравнений равновесия и диффузии для микрополярной среды не является полноценной вследствие симметричного запрета связи аксиальных векторов, описывающих моменты и вращения, и полярных скаляров, описывающих дилатацию и концентрационные напряжения, в рамках изотропии. В чем это может проявиться, не ясно.

3. Хотелось бы отметить, что в статистической формулировке задачи растяжения структурно-неоднородного упругого цилиндра концентрация напряжений вблизи границы зависит от осевых напряжений. Подобные вопросы для нелинейной ползучести исследовали Н. Н. Попов и Ю. П. Самарин. По-видимому, в нагруженных осевыми, изгибными либо крутильными усилиями длинномерных конструкциях диффузия должна протекать более интенсивно, чем в свободных. В диссертации источники концентрации напряжений — моменты-пары на границе — не зависят от наличия растягивающей нагрузки.

Высказанные замечания говорят о возможностях продолжения исследования, не ставя под сомнение полученные результаты работы, имеющей свою внутреннюю логику.

8. Заключение по диссертации.

Диссертация представляет собой самостоятельную завершенную научно-квалификационную работу, в которой теоретически изучено влияние микроструктуры материала на характеристики массопереноса в твердом теле, в частности, для задачи насыщения поверхностного слоя нагруженного тела внешней примесью, имеющей важное прикладное значение для прогнозирования ресурса эксплуатации металлических конструкций в агрессивной среде. Диссертационная работа Фроловой Ксении Петровны на тему «Анализ влияния микроструктуры деформируемого тела на характеристики массопереноса» 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 28.08.2017 года), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) — филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
доктор физико-математических наук (01.02.04), доцент



Келлер Илья Эрнстович

Служебный телефон: +7(342)2378307 E-mail: kie@icmm.ru

Служебный адрес: 614018, г.Пермь, ул. Акад. Королёва, д.1, ИМСС УрО РАН

Подпись И.Э. Келлера заверяю
Ученый секретарь ИМСС УрО РАН,
кандидат физико-математических наук

Юрлова Н.А.

12 мая 2022 года