

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.097.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.12.2022 г., протокол № 35

О присуждении **Григорьевой Полине Михайловне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние деформаций высокопрочных конструкционных материалов на транспорт водорода из внешней среды» по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите 13 октября 2022 года (протокол заседания № 34) диссертационным советом 24.1.097.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61, в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации о создании диссертационного совета № 1902-1321 от 10.10.2008, состав совета переутвержден приказом № 532/нк от 25.05.2022.

Соискатель Григорьева Полина Михайловна, 1994 года рождения, в 2017 году окончила с отличием Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ») с присуждением квалификации магистра по направлению «Механика и математическое моделирование». Соискатель работает стажером-исследователем в лаборатории прикладных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории прикладных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт

проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Полянский Владимир Анатольевич, доктор технических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

– Греков Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры вычислительных методов механики деформируемого тела факультета прикладной математики – процессов управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

- Работа содержит ряд погрешностей грамматического и смыслового характера. Например: Стр. 12: ... решения задачи о взаимном влиянии напряженно-деформированного состояния металла на накопление и перераспределение водорода ... Стр. 85: Решения ..., а также выбор модели ... взаимно влияют на распределение водорода внутри твердого тела. Стр. 91: ... уравнение диффузии газа в твердое тело, которое учитывает взаимовлияние напряженно-деформированного состояния этого твердого тела. Стр. 21: ... два подгоночных параметра, размер которых равен некоторому объему. Стр. 16: ... напряженно-деформированного состояния плоской полубесконечной полукруглой трещины.... Стр. 85: ... распределение водорода в среде с плоской полукруглой полубесконечной трещиной. Стр. 100: ... Рассмотрим бесконечное тело с полубесконечной трещиной начального круглого отверстия. Стр. 116: ... плоская задача о полубесконечной полукруговой трещине. Стр. 64: ... для полого цилиндра касательные напряжения являются сжимающими.
- Формулировка задачи о плоском фронте химической реакции в параллелепипеде содержит неопределенности и может трактоваться по-разному. Поскольку граней, перпендикулярных фронту, четыре, то неясно, какие перемещения или силы заданы на каких гранях. Если одни и те же перемещения или силы заданы на противоположных гранях (как можно понять из формулировки), то параллелепипед будет смещаться, как жесткое целое. Кроме того,

рассмотренные случаи граничных условий не гарантируют того, что реализуется плоское напряженное состояние. Для этого нужно еще считать, что размер параллелепипеда в направлении оси x_3 , т. е. перпендикулярно фронту, намного меньше, чем размеры в направлении двух других осей координат.

- В плоской задаче о диффузионном потоке через поверхность полубесконечной трещины с закругленной вершиной граничные условия (147) и второе условие в (148) на оси симметрии не соответствуют правильной словесной формулировке задачи. Кроме того, нормальные напряжения в (148), действующие на оси симметрии в направлении этой оси, названы касательными напряжениями.
- Мерсон Евгений Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела №2 Научно-исследовательского института прогрессивных технологий ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:
 - На стр. 28 автор пишет «Таким образом, можно сделать вывод, что деформации и напряжения могут влиять на диффузию только через параметр a » и «параметр a определяет, насколько легко молекулы газа могут диффундировать. Следовательно, это зависит от расстояния между зернами». Во-первых, неясно, почему речь идет о молекулах газа, тогда как хорошо известно, что в металлах водород диффундирует в виде атомов (протонов, экранированных электронным газом), а не в виде молекул, которые не обладают диффузионной подвижностью. Во-вторых, непонятно, почему по мнению автора влияние напряжений на диффузионную подвижность водорода осуществляется только через изменение межзеренного пространства, тогда как диффузия водорода происходит не только по границам зерен, но и через тело (кристаллическую решетку) зерна. Очевидно, что изменение межатомного расстояния, связанное с приложением внешних напряжений, также должно оказывать влияние на скорость диффузии водорода.
 - В работе не предпринята попытка экспериментальной проверки или сопоставления с литературными данными результатов теоретического описания влияния напряжений и деформаций на коэффициент диффузии водорода, а также скорость

распространения фронта химической реакции, контролируемой притоком водорода, что оставляет открытым вопрос о достоверности результатов проведенных теоретических изысканий.

- В таблице 2 не приведены погрешности измерения концентраций водорода, что не позволяет оценить значимость отличий между значениями, полученными для разных материалов. Кроме того, в работе не указано, какое количество образцов каждого материала было исследовано, что затрудняет оценку воспроизводимости полученных результатов.
- В главе 2 при обсуждении результатов анализа термодесорбции водорода из порошков гидрида титана автор не рассматривает фазовые превращения, которые, вероятно, протекают в материале при его нагреве и могут оказывать влияние на энергию активации выхода водорода. В частности, в работе [Jimenez C. et al. Acta Mat. 59. 2011, 6318-6330] было убедительно показано, что появление второго пика на экстракционной кривой водорода совпадает с фазовым превращением $\delta \rightarrow \beta$. Кроме того, автор утверждает, что исследуемые порошки получены в аморфном состоянии, но каких-либо подтверждений этому (например, дифрактограмм) не приведено. Вывод о том, что «гидрид титана нельзя считать классическим химическим соединением» спорный и требует серьезной проверки.
- Автор говорит о том, что при получении экстракционных кривых использовался порошок титана с размером частиц от 10 до 100 мкм; как известно из недавних исследований, на которые ссылается автор, на вид экстракционных кривых может значительным образом влиять распределение водорода внутри образца. Автор не указывает, являются ли исследуемые частицы достаточно мелкими, чтобы не учитывать этот эффект.
- При введении в рассмотрение каждой из ловушечных моделей автор вводит зависимость индуцированных деформаций от водорода, утверждая, что эти деформации зависят только от концентрации диффузно подвижного водорода. Однако работа [176], на которую автор ссылается, экспериментально подтверждает этот факт только для незначительных градиентов концентрации водорода на поверхности. Остается неясным, может ли ловушечный водород индуцировать внутренние

деформации, и насколько сильно эти внутренние деформации будут влиять на запирающий эффект.

- Работа содержит ряд погрешностей грамматического и смыслового характера. Например: «два подгоночных параметра, размер которых равен некоторому объему» (стр. 21), «бесконечное тело с полубесконечной трещиной начального круглого отверстия» (стр. 116), «касательные напряжения» вместо «нормальных» в формуле (148) на стр. 99. Кроме того, граничные условия в уравнении (147) и (148) на стр. 99 не соответствуют правильной словесной формулировке задачи, а также правильной графической иллюстрации на рисунке 34 (стр.99).

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном Петровым Сергеем Николаевичем, доктором физико-математических наук, начальником лаборатории 41, а также Барахтиным Борисом Константиновичем, кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории 41, и утвержденном Ильиным Алексеем Витальевичем, доктором технических наук, заместителем генерального директора, начальником НПК-3, указала, что диссертационная работа Григорьевой П.М., посвященная описанию диффузии водорода в рамках линейной неравновесной термодинамики, которая позволяет учесть различные аспекты миграции водорода из внешней среды с учетом влияния напряженно-деформированного состояния металла, представляется актуальной. Отмечено, что в работе в рамках одного подхода линейной неравновесной термодинамики определен вклад зависящей от механических напряжений диффузии в скорость химической реакции в твердом теле. Впервые исследованы дискретные термодесорбционные спектры водорода и его изотопов для определения энергии активации и порядка химической реакции. В рамках линейной неравновесной термодинамики уточнены и дополнены модели диффузии газа в напряженно-деформированном твердом теле с учетом каналов транспорта связанного водорода. В рамках теории упругости разработаны и верифицированы численные программы для реализации разработанных моделей в краевых задачах о влиянии напряженно-деформированного состояния в теле на диффузию и

взаимодействие водорода с металлом. Для наблюдаемых в металлах экспериментально тонких приповерхностных слоев разработана совокупность моделей возникновения и насыщения их водородом.

Отмечается, что диссертационная работа Григорьевой П.М. «Влияние деформаций высокопрочных конструкционных материалов на транспорт водорода из внешней среды» позволяет описать влияние деформаций материалов на перемещение водорода из внешней среды в металл с образованием тонкого приповерхностного слоя. Полученные в диссертации данные могут служить теоретической базой для разработки практических методик прогнозирования и оценки ресурса конструкционных материалов, а также при разработке методов хранения и транспортировки водорода. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – «Механика деформируемого твердого тела». Диссертационная работа отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Григорьева Полина Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

В отзыве ведущей организации, обсужденном и утвержденном на заседании научно-технической секции №3 29 ноября 2022 года, имеются следующие замечания:

1. Использованные автором физико-химические модели для расчетов кинетики наводороживания конструкционных материалов не в полной мере учитывают современные представления металловедения о процессах миграции водорода в твердое тело, в частности, образование слоя гидрида на поверхности металла не характерно для процесса наводороживания титановых сплавов.

2. Из научных публикаций известно, что водородное охрупчивание сталей и сплавов проявляется при пластической деформации (возможно локальной – в вершине трещины). Диссертант упоминает о таких работах во введении, однако моделирование поведения металла проводит в рамках классической теории упругости.

3. Диссертант считает основополагающей причиной формирования насыщенного водородом поверхностного слоя образование химических

соединений. Такое соединение известно для титановых сплавов – гидрид титана, именно оно исследовано в работе. Но при этом полученные для химических соединений закономерности автор распространяет и на стали, где механизм воздействия водорода совершенно другой (водород диффундирует в металл как элемент внедрения).

4. Параметры для расчета кинетики распространения фронта химической реакции наводороживания титановых сплавов в условиях напряженно-деформированного состояния взяты из доступных автору параметров высокотемпературного окисления кремния. Поэтому полученные результаты требуют экспериментальной верификации.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 8 работ (2 работы в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, и 5 работ в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science).

Основные результаты автором апробированы в полной мере и соответствуют содержанию диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, их виде, авторском вкладе и объеме научных изданий.

Наиболее значимыми публикациями по теме диссертации являются

Список ВАК Минобрнауки РФ:

1. Григорьева П.М. Влияние выбора ловушечной модели на диффузию водорода в металлы из внешней среды // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – Т. 15. № 3. – С. 71-82.
2. Grigoreva P., Vilchevskaya E. N., Muller W. H. Modeling stress-affected chemical reactions in solids—a rational mechanics approach // *Advances in Mechanics of Microstructured Media and Structures*. – Springer, Cham, 2018. – С. 157-183

Scopus и Web of Science:

3. Grigoreva P., Vilchevskaya E. N., Muller W. H. Stress and Diffusion Assisted Chemical Reaction Front Kinetics in Cylindrical Structures // *Contributions to Advanced Dynamics and Continuum Mechanics*. – Springer, Cham, 2019. – С. 53--72.
4. Grigoreva P., Vilchevskaya E., Polyanskiy V. The influence of elastic deformations in high-strength structural materials on the hydrogen

transport //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 225. – С. 1010.

5. Grigoreva P. M., Vilchevskaya E. N., Polyanskiy V. A. Influence of Linear Elastic Stresses on Hydrogen Diffusion into Metals //Advances in Hydrogen Embrittlement Study. – 2021. – С. 143-157.
6. Grigoreva P. M. et al. Determination of the Activation Energy of Hydrogen from Their Compounds with Titanium //Advances in Hydrogen Embrittlement Study. – 2021. – С. 131-142.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов (все положительные):

1. Отзыв директора Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН, члена-корреспондента РАН, д.ф.-м.н., Плехова Олега Анатольевича с замечаниями:

- На странице 7 автореферата автор дважды ссылается на подход, предложенный Александром Борисовичем Фрейдиным, при этом не делает ссылки на конкретную работу или публикацию. Наверное, было бы уместно привести ссылку на работу, в которой наиболее полно изложен данный подход для расчета скорости химической реакции.
- В работе получен интересный результат об отсутствии запирающего эффекта при описании диффузии водорода по ловушкам с использованием тензора повреждаемости. Возможен ли в рамках предложенной модели анализ зависимости эффекта диффузии от размера зерна и описание перехода к аномальной диффузии в субмикрористаллических материалах?

2. Отзыв руководителя лаборатории госэталонов и научных исследований в области измерений низкого абсолютного давления и вакуума ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», к.т.н., Чернышенко Александра Александровича с замечаниями:

- В уравнении 4 дважды используется английское слово «at», на мой взгляд правильнее использовать русское слово «на» или «около»
- Отсутствует расшифровка некоторых условных обозначений в формулах, в частности в формуле 6, 8, 9, 11 микротрещин.

3. Отзыв директора Института проблем машиностроения РАН - филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», д.ф.-м.н., профессора Ерофеева Владимира Ивановича без замечаний.

4. Отзыв профессора кафедры «Информационных систем и вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», д.ф.-м.н., Бригаднова Игоря Альбертовича с замечаниями:

- Имеются грамматические ошибки и много стилистических погрешностей. Например, «...диффузию газа внутрь его».
- Фактически дважды повторяется раздел «Научная новизна» - на стр. 3-4 и в конце на стр.14-15.
- На стр.4 утверждается, что результаты работы могут быть использованы ... при разработке методик оценки остаточного ресурса кремниевых интегральных микросхем. Хотелось бы прояснить суть этого утверждения.
- Подпись к Рис.4 начинается со слова «профилЯ». На каком это диалекте?

5. Отзыв инженера 1 категории отдела корабельной и судовой энергетики ФГУП "Крыловский государственный научный центр", к. ф.-м.н., Шувалова Глеба Михайловича с замечаниями:

- Возникновение наводороженного приповерхностного слоя описано и верифицировано на примере цилиндрического образца конкретного радиуса и плоской трещины с конкретным радиусом раскрытия, а задачи о распространении фронта химической реакции – на примерах плоского параллелепипеда, сферы и цилиндра. Из автореферата остается неясным, влияют ли геометрические параметры исследуемых образцов на результаты численного моделирования.
- Несмотря на упомянутые принципы построения численных схем для решения задач, в автореферате недостаточно полно отражены построение и верификация численных схем, которые, несомненно, представляют собой отдельный интерес.

Во всех отзывах указывается, что автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – «Механика деформируемого твердого тела».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются компетентными и авторитетными учеными в области механики деформируемого твердого тела и механики сплошных сред, в области проблем водородной деградации конструкционных материалов, ведущими научную деятельность и имеющими научные публикации в областях науки, затрагиваемых диссертацией. Ведущая организация является одним из крупнейших научных

и инженерных центров в области механики обобщенных сред, материаловедения и разработки и диагностики конструкционных материалов, в котором работают такие авторитетные в данных областях ученые, как д.т.н., А. В. Ильин, д.т.н., профессор Б. З. Марголин, д.т.н., профессор Е. И. Хлусова, и многие другие, способные оценить научную и практическую значимость диссертационной работы.

По результатам защиты диссертационный совет отмечает, что основные научные результаты, полученные соискателем, заключаются в следующем:

Для описания локального увеличения концентрации примеси в твердом теле **разработаны** модели диффузии с учетом влияния полей напряжений и деформаций посредством установления **новых** взаимосвязей между напряженно-деформированным состоянием твердого тела и накоплением и перераспределением газовой компоненты в нем с позиций линейной неравновесной термодинамики.

Проведен анализ экспериментальных данных по определению значения энергии активации водорода в порошках гидрида титана. Для этого **построены** дискретные термодесорбционные спектры водорода и дейтерия при ступенчатом изменении температуры экстракции из гидридов и дейтеридов титана. На основании обработки экспериментальных результатов **впервые сделан вывод** о том, что потоки изотопов водорода из гидрида титана не определяется его химическим разложением. **Впервые сделан вывод** о неприменимости классического подхода Киссингера для определения энергии активации водорода и порядка химической реакции с помощью дискретных термодесорбционных спектров.

Разработан подход для описания наблюдаемого экспериментально явления - возникновения и стабилизации насыщенного водородом тонкого приповерхностного слоя в металлических образцах, находящихся длительное время в водородосодержащей среде. **Разработана новая модель диффузии**, связывающая поток водорода со значением тензора поврежденности металла. **Уточнена и дополнена** модель диффузии газа, учитывающая напряженно-деформированное состояние твердого тела в рамках подхода линейной неравновесной термодинамики. **Впервые решены** уравнения МакНабба и Фостера и уравнения диффузии с полным учетом вклада напряженно-деформированного состояния в процесс транспорта водорода. Модели специфицированы на случай транспорта водорода внутри металлов.

Для локализованной химической реакции между деформируемой твердой и диффундирующей компонентами, кинетика которой описывается

на основе тензора химического сродства, **теоретически исследована** роль учета влияния механических напряжений на тензор коэффициентов диффузии. **Проведено сравнение** влияния различных зависимостей коэффициента диффузии от приложенных и индуцированных химической реакцией напряжений. Для того, чтобы понять, насколько отличается скорость химической реакции с коэффициентом диффузии, зависящим от напряжений и, следовательно, координат, **решены** краевые задачи и **получены** аналитические выражения для зависимости толщины превращенного слоя от времени в зависимости от выбранной модели диффузии

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в диссертации **разработаны новые** подходы механики сплошных сред к описанию локального увеличения концентрации примесей в деформируемых твердых телах, что может привести к деградации механических свойств деталей конструкции. Для учета влияния напряженно-деформированного состояния материала в рамках подхода линейной неравновесной термодинамики **развиты** новые модели диффузии, что расширяет область их применимости.

В результате применения подхода линейной неравновесной термодинамики **получено** уравнение локального баланса диффузионной составляющей, учитывающее зависимость процесса диффузии от напряженно-деформированного состояния твердого тела, концентрации газовой составляющей внутри него и других термомеханических характеристик. Это уравнение специфицировано на случай транспорта водорода в металлы из внешней среды, исследованы влияния линейно-упругих полей напряжений. В уравнение несколькими способами введен второй канал диффузии, отвечающий за массоперенос связанного водорода. Рассмотрена классическая модель МакНабба и Фостера, описывающая диффузию по ловушкам в терминах заполненности этих ловушек. Кроме того, на основе рациональных рассуждений **предложена** модель диффузии по ловушкам с использованием тензора поврежденности, которая рассматривает транспорт связанного водорода как тормозящий поток по поврежденностям в материале.

Для учета влияния напряженно-деформированного состояния и ловушечных мод с позиций линейной неравновесной термодинамики получено решение краевой задачи для цилиндра, через боковую поверхность которого диффундирует водород, и для плоской трещины, через берега которой диффундирует водород. На основании полученного решения

предложен подход к описанию возникновения поверхностного наводороженного слоя.

Разработаны численные методы и программное обеспечение для решения нелинейных (в общем случае) связанных задач об определении напряженно-деформированного состояния цилиндра и плоской трещины и распределения примеси с учетом напряженно-деформированного состояния твердого тела и распределения ловушечных мод с позиций линейной неравновесной термодинамики.

С помощью разработанных методов и программного обеспечения **решены** конкретные связанные задачи в рамках теории упругости и подходов линейной неравновесной термодинамики, на основании полученных решений **проведен** качественный и количественный анализ влияния напряженно-деформированного состояния деформируемого твердого тела на распределение примеси.

Для учета вклада диффузии в кинетику фронта химической реакции **решена** задача о распространении фронта химической реакции в рамках подхода тензорного химического сродства. Чтобы оценить влияние выбора зависимости коэффициента диффузии от механических нагрузок, аналитически **решены** связанные краевые задачи для прямоугольного параллелепипеда, сферы, цилиндра и трубы. В дополнение к рассмотрению феноменологически мотивированной зависимости коэффициента диффузии от напряжения также рассматривалась модель тензора коэффициентов диффузии.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что они могут быть использованы при описании массопереноса в деформируемых твердых телах. Предложенные в работе подходы к моделированию диффузии и полученные результаты численного моделирования могут быть использованы для дальнейшего исследования влияния деформаций высокопрочных конструкционных материалов на транспорт водорода из внешней среды. Кроме того, полученные результаты могут послужить теоретической базой для разработки практических методик прогнозирования и оценки остаточного ресурса конструкционных материалов. Помимо водородной деградации металлов и сплавов, полученные в работе результаты имеют приложения в разработке методов хранения и транспортировки изотопов водорода, а также при разработке методик оценки остаточного ресурса кремниевых интегральных микросхем.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что

- В ходе исследования использовались апробированные в литературе гипотезы и общепризнанные фундаментальные методы механики сплошных сред, теории упругости, линейной неравновесной термодинамики.
- Полученные в работе результаты моделирования качественно и количественно соответствуют имеющимся в научной литературе и полученным в ИПМаш РАН экспериментальным данным.
- Полученные в работе решения сводятся к решениям, полученным и апробированным в литературе при пренебрежении влиянием ряда учтенных в работе факторов.

Личный вклад соискателя состоит в

- Непосредственном участии в формулировке и постановке целей и задач диссертационного исследования;
- Непосредственном участии в разработке общих подходов, новых моделей, методик расчета, методик обработки экспериментальных данных и программного обеспечения для анализа влияния напряженно-деформированного состояния деформируемого твердого тела на массоперенос;
- Построении аналитических и численных решений поставленных задач, проведении анализа и интерпретации полученных решений;
- Непосредственном участии в подготовке публикаций по теме диссертации и апробации результатов исследования на конференциях и семинарах.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Из диссертационной работы диссертанта не очень понятно, что можно называть индуцированными водородом напряжениями. Как известно в литературе, водород может не только вызывать внутренние деформации в металле, но и изменять внутреннюю структуру. Не очень ясно, какой из этих эффектов будет проявляться в первую очередь. Кроме того, представляется неочевидным, какой именно водород – диффузно подвижный или связанный – будет в большей степени оказывать влияние на величину возникающих в результате диффузии водорода собственных деформаций материала.
2. Введение зависимости потока связанного водорода от поврежденности ставит вопрос о возникновении этой поврежденности и индуцированного ею напряженно-деформированного состояния. А именно, есть ли смысл рассматривать поврежденность материала без учета пластических деформаций, возникающих в нем.

3. В диссертационной работе изменение коэффициента диффузии связывается с изменением межзеренного промежутка, в связи с чем возникает вопрос, действительно ли водород будет диффундировать только по границам зерен, или также необходимо рассматривать диффузию водорода через кристаллическую решетку.

Соискатель Григорьева П.М. согласилась с замечаниями, ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, привела собственную аргументацию и указала, что диссертационная работа опиралась на известные данные. Опубликованные работы других авторов анализируют классическую ловушечную модель МакНабба и Фостера, переносят результаты анализа на все ловушечные модели, и утверждают, что водород в ловушках не индуцирует деформации металла. Это утверждение становится сомнительным, когда деформации переходят в область пластических. В этом случае Таха и Софронис вводят в модель МакНабба и Фостера эмпирические зависимости описывающие кратное увеличение количества ловушек, и их емкости с ростом нормы пластической деформации, однако, этот эффект описан в диссертации с помощью модели поврежденности, что обеспечивает более общий подход к описанию явлений, связанных с развитием водородной хрупкости. Григорьевой П. М. было отмечено, что связь поврежденности с пластическими деформациями является перспективным направлением исследований в дальнейшем, поскольку в проблемах водородной хрупкости не всегда представляется ясным, что именно было ее источником и первопричиной. При описании возникновения наводороженного приповерхностного слоя рассмотрение наличия поврежденности, без учета причин ее возникновения, позволяет получить результаты, достаточно точно описывающие эксперимент количественно и качественно.

Соискатель отметила, что в диссертации рассматривалась диффузия водорода из внешней среды. Молекула водорода достаточно большая, чтобы диффундировать в основном по границам зерен. Несмотря на то, что в литературе имеются экспериментальные данные о диффузии водорода и в теле зерен, радиоизотопный анализ показывает, что количество такого водорода пренебрежимо мало по сравнению с количеством водорода, диффундирующего по границам.

Диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация Григорьевой Полины Михайловны представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года

На заседании 27 декабря 2022 года диссертационный совет принял решение за развитие подходов механики сплошных сред к учету влияния напряженно-деформированного состояния на характеристики массопереноса с позиций линейной неравновесной термодинамики присудить Григорьевой Полине Михайловне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение учёной степени – 15, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета 24.1.097.01,
чл.-корр. РАН, д.ф-м.н., профессор



Индейцев

[Signature] Дмитрий Анатольевич

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.097.01,
д.т.н.

[Signature]

Седакова

Елена Борисовна

27 декабря 2022 г.