



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**



«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов



«ПРОМЕТЕЙ»

**имени И. В. Горынина
Государственный научный центр**

УТВЕРЖДАЮ



**Заместитель генерального
директора,
начальник НПК-3,
д.т.н., доцент**

А.В. Ильин

«29» ноября 2022

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на диссертацию Григорьевой Полины Михайловны «Влияние деформаций высокопрочных конструкционных материалов на транспорт водорода из внешней среды», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации

Повышение прочности металлов и сплавов является одним из основных направлений развития современных технологий. Одной из проблем, возникающих в ходе разработки таких сплавов и конструкций из них, является зависимость механических характеристик металлов от концентрации водорода, т.к. нарушение процессов эксплуатации конструкций может привести к незащищенности металла от агрессивной среды. Индуцированное водородом разрушение может происходить локально даже при средних концентрациях, находящихся в допустимых пределах по принятым моделям водородного охрупчивания. При моделировании, прогнозировании и расчете прочностных параметров конструкций требуется учитывать аспекты накопления и перераспределения водорода с учетом напряженно-деформированного состояния в узлах изделий. Существующие модели

миграции водорода разработаны для частных случаев нагружения образцов, находящихся в простом напряженно-деформированном состоянии. С помощью известных моделей удастся описать распределение водорода с учетом дефектов микроструктуры и ловушек разной природы, но сопоставление полученных оценок обнаруживает многократный разброс значений. Это существенно затрудняет обеспечение технической (эксплуатационной) безопасности металлоконструкций. В связи с этим требуется улучшить существующие модели транспорта водорода в твердой среде.

В связи с этим исследование характера распределения концентрации водорода внутри металлов является важной и актуальной задачей.

Оценка научной новизны

Представленная работа посвящена 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. Используемая методология позволила описать диффузию водорода для широкого спектра условий, являясь универсальным и адаптируемым способом сведения разных экспериментальных данных без необходимости пересчета констант материалов. В получении и обработке данных моделирования использованы строгие математические методы. В итоге автор получил данные, обладающие научной новизной:

- впервые в рамках одного подхода линейной неравновесной термодинамики определен вклад диффузии, зависящий от механических напряжений, в скорость химической реакции в твердом теле с предложением рациональной модели тензодиффузии;
- 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 акты диффузии и взаимодействия водорода с металлом;
- для наблюдаемых в металлах экспериментально тонких приповерхностных слоев разработана совокупность моделей возникновения их насыщения водородом.

Теоретическая и практическая значимость работы

Использованные подходы позволили описать влияние деформаций материалов на перемещение водорода из внешней среды в металл с образованием тонкого приповерхностного слоя. Полученные данные могут служить теоретической базой для разработки практических методик прогнозирования и

оценки ресурса конструкционных материалов, а также при разработке методов хранения и транспортировки водорода.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач, строгостью применяемого математического аппарата, выполнимостью предельных переходов к известным решениям.

Личное участие автора

В научной литературе нет однозначной определенности учета влияния напряженно-деформированного состояния твердого тела на диффузию в нем водорода. Известные модели кинетики, металлофизики и квантовой механики зачастую предлагают сложные для решения кинетические уравнения и определения модельных констант. Стоит заметить, что диффузия газа может оказать влияние и на протекание химических реакций в металле, поскольку химические процессы также подвержены влиянию вида напряженно-деформированного состояния в твердом теле.

Представленные в работе теоретические результаты получены и проанализированы автором. В решении поставленных задач использованы литературные данные и результаты проведенных с коллегами экспериментов. В выборе направлений исследований и обсуждении получаемых данных принимали участие известные в научном мире коллеги.

Конкретное участие автора заключается в формулировке задач исследования:

- описание диффузии в условиях напряженно-деформированного состояния с учетом скорости химической реакции в твердом теле;
- определение энергии активации для изотопов водорода;
- разработке теоретических основ, моделей и численных алгоритмов для решения задачи о влиянии напряженно-деформированного состояния металла на накопление и перераспределение водорода внутри него в рамках линейной неравновесной термодинамики.

Для решения поставленных задач автор использовал методы механики сплошных сред. Моделирование поведения металла осуществлялось в рамках классической теории упругости. Численные решения основывались на применении метода конечных разностей.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Григорьевой П. М. состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 184 наименований. Работа изложена на 142 страницах и содержит 43 рисунка и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования и проведен анализ степени ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, перечислены методы исследования, отмечены значимость работы и научная новизна, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, отмечен личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме диссертационного исследования.

Первая глава посвящена влиянию выбора зависимости коэффициента диффузии от напряженно-деформированного состояния на скорость протекания химической реакции в твердом теле между твердым телом и газом, который подходит к фронту химической реакции, и результатом которой является новый компонент.

Вторая глава посвящена определению энергии активации водорода в его соединениях с металлом методом анализа термодесорбционных спектров водорода и обработке экспериментальных результатов, полученных методом термодесорбционных спектров.

Третья глава посвящена моделированию диффузии в твердом теле с учетом взаимного влияния напряженно-деформированного состояния твердого тела на транспорт водорода внутрь его.

В заключении приведены основные результаты работы и сформулированы выводы.

Содержание диссертации специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, корректно и достаточно полно отражает ее основные положения и результаты. Структура и объем автореферата соответствуют установленным стандартам.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в Институте проблем машиноведения РАН и в других научных учреждениях, высших учебных заведениях, научно-исследовательских институтах, занимающихся разработкой моделей поведения материалов в реакционно-активных средах.

Апробация работы

Все основные положения диссертации в достаточной мере отражены в опубликованных работах. Всего по материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Работа прошла

апробацию на всероссийских и международных научных конференциях, а также на семинарах российских и одного зарубежного ВУЗов.

При рассмотрении представленной работы отмечен ряд замечаний:

1. Используемые 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.

5. Из текста диссертации и автореферата непонятно, что подразумевается под «внешней средой», приведенной в названии. Если это газовая среда, содержащая водород в молекулярном состоянии, на что указывает аппарат термодинамики и закономерности протекания химических реакций, применяемые в главе 1, то возникает вопрос: могут ли полученные автором заключения распространяться на водные электролиты и электрохимические процессы выделения и диффузии атомарного водорода в конструкционных материалах

Сделанные замечания относятся к вопросам интерпретации результатов и не снижают строгости математического моделирования и численных решений, осуществленных в рамках методов механики сплошных сред и классической теории упругости. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком методическом уровне.

Заключение

Диссертационная работа Григорьевой П.М. «Влияние деформаций высокопрочных конструкционных материалов на транспорт водорода из внешней среды» вносит вклад в развитие механики деформируемого твердого тела в части развития подходов механики сплошных сред к исследованию взаимовлияния транспорта водорода из внешней среды на напряженно-деформированное состояние металла. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научно-методическом уровне. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – «Механика деформируемого твердого тела». Диссертационная работа отвечает всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 01.10.2018 г., Постановление Правительства РФ №1168), 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.

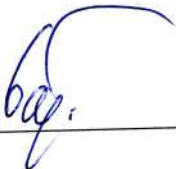
Отзыв обсужден и утвержден на заседании секции НТС №3 (протокол №13 от 29.11.2022 г.).

Начальник лаборатории 41,
доктор технических наук

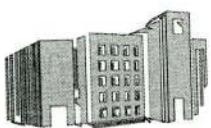


Петров Сергей
Николаевич

Ведущий научный
сотрудник лаборатории 41,
кандидат физико-
математических наук



Барахтин Борис
Константинович



НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
191015, Россия, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49
Телефон (812) 274-37-96, Факс (812) 710-37-56, mail@crism.ru, www.crism-prometey.ru
ОКПО 07516250, ОГРН 1037843061376, ИНН 7815021340/ КПП 784201001