

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 11.10.2018 № 23

О присуждении *Тихомировой Ксении Алексеевны*, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Феноменологическое моделирование процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы. Одномерный случай» по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 06.08.2018, протокол № 20, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Тихомирова Ксения Алексеевна 1990 года рождения, в 2014 г. окончила ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности «Прикладная механика», квалификация «Магистр», специальное звание «Магистр-инженер». В 2018 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела. В настоящее время работает ведущим инженером лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории нелинейной механики деформируемого твердого тела ИМСС УрО РАН.

Научный руководитель – заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела ИМСС УрО РАН, д.ф.-м.н., профессор Роговой А.А.

Официальные оппоненты:

1. Мовчан Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук (г. Москва),
 2. Кашенко Михаил Петрович, доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет (г. Екатеринбург),
- дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет", г. Санкт-Петербург, в своем положительном заключении, подписанным академиком РАН, д.ф.-м.н., профессором Морозовым Никитой Федоровичем, профессором с возложенной обязанностью заведующего

кафедрой теории упругости и Волковым Александром Евгеньевичем, д.ф.-м.н., профессором кафедры теории упругости, и утвержденном проректором по научной работе ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет", д.г.-м.н., профессором Аплоновым С.В., указала, что диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой разработана оригинальная феноменологическая модель деформации сплавов с памятью формы (СПФ), позволяющая учитывать историю изменения напряжения, при действии которого происходит фазовый переход; экспериментально проверена лежащая в основе модели гипотеза о независимости диаграммы деформирования образца в мартенситном состоянии от способа достижения этого состояния. Представленная диссертационная работа «Феноменологическое моделирование процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы. Одномерный случай» удовлетворяет критериям Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Тихомирова Ксения Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела».

Соискателем опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Тихомирова К.А. Разработка и численная реализация одномерной феноменологической модели фазовой деформации в сплавах с памятью формы // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, №2. – С. 192-206.
2. Tikhomirova K. Computation of phase and structural deformations in shape memory alloys. One-dimensional model // Materials Today: Proceedings. – 2017. – No. 4. – P. 4626-4630.
3. Тихомирова К.А. Изотермическое деформирование сплава с памятью формы в разных температурных интервалах. Случай одноосного растяжения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23, №2. – С. 263-282.
4. Тихомирова К.А. Феноменологическое моделирование фазовых и структурных деформаций в сплавах с памятью формы. Одномерный случай // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, №1. – С. 36-50.
5. Тихомирова К.А. Экспериментальное и теоретическое исследование взаимосвязи фазовой и структурной деформаций в сплавах с памятью формы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – №1. – С. 40-57.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Мовчана А.А. В отзыве представлена актуальность темы диссертации; проведён анализ наиболее важных результатов; отмечены новизна и достоверность полученных результатов. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации:

- Модель способна описать не все макромеханические эффекты в СПФ: в частности, она не описывает явление ориентированного превращения, а из двух известных типов эффекта реверсивной памяти формы представлен только один.

- Диаграмма мартенситной неупругости изображается "слишком схематически" в виде кривой, выпуклой в направлении оси деформаций, но начинающейся не из начала координат, а из некоторой точки оси напряжений с абсциссой, равной напряжению, с которого начинается структурное превращение. Тогда как экспериментальные данные свидетельствуют о том, что линейно-упругий участок в начале диаграммы мартенситной неупругости отсутствует.

- На стр. 42 имеется фрагмент: $F_1(\sigma_1) = F_2(f(\sigma_2)) = F(\sigma)$ где $F(y)$ – общая для двух диаграмм функция. Эта запись требует объяснений. Не понятно, что здесь понимается под аргументом σ и под функцией F ? Не понятно, почему в следующей фразе теста диссертации выделяется случай отсутствия предела структурного превращения, для которого необходимо требовать совпадения диаграмм фазового и структурного превращения.

- В тексте диссертации приводится значение деформации объемного эффекта реакции прямого превращения в никелиде титана $\varepsilon_V = 0.34\%$, однако нигде не указывается, что понимается под величиной ε_V - само относительное изменение объема или линейная деформация, соответствующая объемной, которая в 3 раза меньше.

- Вызывают вопросы результаты, связанные с аппроксимацией полученных в эксперименте диаграмм обратного фазового перехода формулой, которая дает кривую, симметричную относительно середины диаграммы. Следовало использовать известные несимметричные аппроксимации.

2. Положительный отзыв официального оппонента Кащенко М.П. В отзыве отмечена актуальность темы диссертации; представлены основные результаты работы и их достоверность. Оппонент отмечает следующие замечания:

- Использование некоторых терминов недостаточно обосновано: "мартенситный элемент", "универсальная модель". Гипотезу после ее экспериментального подтверждения следовало бы называть постулатом.

- Используемая в работе гипотеза 2 об обратном порядке исчезновения мартенситных элементов на практике не всегда имеет место.

- Перед изложением алгоритма модели было бы целесообразно перечислить все утверждения и соотношения, принимаемые в дальнейшем в качестве аксиом.

В отзыве также содержится вопрос о возможности применения модели к описанию деформационного поведения монокристалла.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отражена актуальность темы диссертации, ее теоретическая и практическая значимость, научная новизна, проанализированы основные результаты, обозначена их обоснованность и достоверность. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- Не указано, какие изменения необходимо внести в модель, чтобы можно было описывать деформацию других СПФ, помимо никелида титана.

- Не комментируется влияние пластической деформации на мартенситное превращение и переориентацию мартенсита.

- При описании экспериментов не указаны характеристические температуры и скрытая теплота превращений для материала в состоянии поставки.

- На с. 36 и 58 указывается, что изменение объема при прямом превращении в никелиде титана составляет +0,34%. Однако, литературные данные, основанные на рентгеноструктурных исследованиях, дают различающиеся значения объемного эффекта. Результаты измерения на dilatометре сильно зависят от текстуры образца и не могут быть использованы для измерения объемного эффекта.
- Не выполнено исследование деформации ориентированного превращения.
- Замечания по оформлению: (а) на графиках с. 66 следовало бы в более крупном масштабе отобразить переходный интервал; (б) пропущен знак производной по времени в формуле на с. 132.

На автореферат поступило 4 отзыва:

1. Положительный отзыв от Маркина А.А., д.ф.-м.н., профессора кафедры вычислительной механики и математики ФГБОУ ВПО "Тульский государственный университет", г. Тула (2 замечания);
2. Положительный отзыв от Коробейникова С.Н., д.ф.-м.н., заведующего лабораторией механики разрушения материалов и конструкций ФГБУН "Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук", г. Новосибирск (без замечаний);
3. Положительный отзыв от Альеса М.Ю., д.ф.-м.н., профессора, директора ФГБУН "Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук", и Дорофеева Г.А., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника ФГБУН "Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук", г. Ижевск (1 вопрос);
4. Положительный отзыв от Семенова В.Н., д.т.н., главного научного сотрудника ФГУП "Центральный аэрогидродинамический институт", профессора кафедры прикладной механики и информатики ФГАОУ ВО "Московский физико-технический институт (государственный университет)", г. Жуковский (1 замечание).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- В автореферате отсутствует формальное представление совокупности уравнений, составляющих построенную модель.
- Значимость вклада структурной деформации, оцененную на основании решения задачи о совместном деформировании пакета стержней, следовало указать численно в сравнении с упругой и фазовой деформацией.
- Не ясно, может ли и в какой степени разработанная модель быть распространена на другие сплавы с памятью формы, помимо никелида титана.
- Желательно было бы разместить в автореферате большее количество графического материала.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области механики фазовых переходов в металлических сплавах, имеют большое число публикаций с разработанными ими математическими моделями, описывающими переходные процессы в этих материалах; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет" хорошо известна своими достижениями в области механики деформируемого твердого тела, на базе математико-механического факультета активно ведутся теоретические и экспериментальные исследования термомеханического поведения сплавов с памятью формы на макро- и микроуровнях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана одномерная феноменологическая модель для описания фазовых и структурных деформаций в сплавах с памятью формы (СПФ), учитывающая взаимосвязь фазовых и структурных переходов и влияние истории деформирования на последующее поведение. Модель позволяет единообразно описать широкий перечень характерных для СПФ макромеханических эффектов;

предложен оригинальный подход к учету фазовой и структурной деформации, основанный на взаимосвязи диаграмм прямого превращения и мартенситной неупругости и использующий гипотезу о независимости пути дальнейшего деформирования мартенсита от типа начальной деформации (фазовой или структурной); экспериментально **доказана** оправданность введенной гипотезы и установлен характер взаимосвязи диаграмм прямого превращения и мартенситной неупругости на примере проволочных образцов из никелида титана;

в определяющие соотношения **введена** функция управляющего напряжения, с помощью которой осуществляется единообразный учет фазовой и структурной деформаций и учет истории деформирования; **введена** в рассмотрение цепочка из последовательно соединенных структурных элементов, представляющая геометрическую интерпретацию модели;

предложена теоретическая классификация типов диаграмм изотермического деформирования с описанием каждого типа с помощью разработанной модели.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны справедливость теоретического представления о взаимосвязи фазовых и структурных деформаций в СПФ на макроуровне, в частности, гипотезы о независимости пути дальнейшего деформирования мартенсита от типа начальной деформации; адекватность разработанной модели на основании описания экспериментальных данных и сопоставления с результатами известных аттестованных моделей.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использован комплекс численных методов при построении дискретного аналога определяющих соотношений и решении модельных задач;

изложено теоретическое представление о взаимосвязи фазовых и структурных деформаций в СПФ на макроуровне;

раскрыты границы применимости данного теоретического представления;

изучена взаимосвязь фазовых и структурных деформаций в СПФ на макроуровне;

проведена модернизация существующих экспериментальных методик получения диаграмм прямого превращения и мартенситной неупругости, а также функции их взаимосвязи.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана одномерная математическая модель для расчета фазовых и структурных деформаций в СПФ;

определены используемые в модели материальные функции;

создан алгоритм численной реализации разработанной одномерной модели для расчета напряженно-деформированного состояния элементов из СПФ;

представлены методические рекомендации для экспериментального получения диаграмм прямого превращения и мартенситной неупругости и функции их взаимосвязи; классификация и теоретическое описание типов диаграмм изотермического деформирования СПФ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на совокупности образцов с последующей статистической обработкой данных; использованы методические рекомендации, позволяющие снизить погрешность измерений, и выполнены контрольные измерения;

теория построена с использованием фундаментальных результатов механики деформируемого твердого тела, термодинамики сплошных сред, согласуется с экспериментальными результатами;

идея базируется на анализе экспериментальных результатов для фазовых и структурных переходов в СПФ;

установлено качественное и количественное согласование результатов, предсказываемых моделью, с экспериментальными данными из литературы и с предсказаниями других апробированных моделей;

использованы методы феноменологического моделирования, модифицированные экспериментальные методики определения материальных функций модели, комплекс численных методов для построения дискретного аналога модели.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач экспериментального и теоретического исследования, в выборе и реализации методов и подходов, наиболее применимых для их достижения, в получении результатов, составивших основное содержание диссертационной работы. Теоретическое представление о взаимосвязи фазовых и структурных деформаций в СПФ, отчасти основанное на известных работах других авторов, но по-иному сформулированное, экспериментально подтверждено лично автором. Автору принадлежит разработка и апробация феноменологической модели, основанной на данном теоретическом представлении, сопоставление ее с известными моделями, а также разработка теоретической классификации типов диаграмм изотермического деформирования СПФ.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

На заседании 11 октября 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Тихомировой К.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 19, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеев Валерий Павлович

 / Матвеев В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович

 / Зуев А.Л.

17 октября 2018 г.

