

# ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу

Тихомировой Ксении Алексеевны «Феноменологическое моделирование процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы. Одномерный случай», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

В материаловедении сплавы с эффектом памяти формы (обладающие, как правило, термоупругим или магнитоупругим мартенситным превращением) заняли отдельную нишу благодаря широким возможностям практического применения в качестве функциональных материалов техники и медицины. Они во многом уже соответствуют генеральной материаловедческой парадигме создания материалов с требуемыми (для различных целевых функций) свойствами. В русле этой парадигмы реализуется широкий спектр взаимно дополняющих экспериментальных и теоретических исследований. В том числе, конструктивный синтез имеющейся информации о свойствах материалов для прогнозирования их характеристик в разнообразных условиях эксплуатации позволяют выполнять подходы, учитывающие иерархию естественных физических масштабов (среди российских исследований отметим работы В.А.Лихачева, В.Г. Малинина, П.В. Трусова, В.Е.Егорушкина, В.Е. Панина и их последователей). Однако сохраняют свою значимость и другие феноменологические модели. Среди них наиболее привлекательны варианты, минимизирующие число параметров (либо функций), включаемых в теорию на основе обработки экспериментальных данных. Именно к такому классу моделей, по мнению рецензента, следует отнести диссертацию Тихомировой, развивающую подход А.А. Мовчана, которая по предмету (объекту) изучения, методологии и выполненным на основе развитой модели расчетам представляет **актуальное исследование**.

Говоря о **структуре и кратком содержании диссертации**, отмечу:

- первая глава (из 5 глав) содержит литературный обзор известных микроструктурных и макроструктурных моделей и отмечается целесообразность в «процессе моделирования не разделять фазовую и структурную составляющие деформации, а учитывать их единообразно, так как обе они связаны с образованием ориентированного мартенсита»;.
- вторая глава посвящена формулировке, экспериментальному обоснованию и обсуждению первой из двух гипотез, акцентирующй внимание на степени ориентированности мартенсита, как основном индикаторе деформационного процесса, и взаимосвязи структурной и фазовой деформации, причем (что принципиально важно!) содержит результаты трех серий экспериментального исследования на проволочных образцах никелида титана (однородные одноосные растяжения),

свидетельствующие о приемлемости гипотезы в определенных интервалах внешних напряжений, как при прямом, так и при обратном мартенситных превращениях;

- третья глава посвящена разработке одномерной феноменологической модели фазовых и структурных деформаций в сплавах с эффектом памяти формы: гипотеза 1 (о независимости последующего деформирования образца от типа начальной деформации) дополняется гипотезой 2 (об обратной последовательности исчезновения мартенситных кристаллов в ходе нагрева), вводится зависимость деформации от управляющего напряжения, зависящего, в свою очередь, от доли мартенсита, и приводятся основные термодинамические соотношения, необходимые для замыкания модели;
- четвертая глава акцентирует внимание на примерах использования модели, в частности, решена связанная термомеханическая задача о совместном деформировании пакета стержней из сплава с эффектом памяти формы;
- пятая глава посвящена теоретической классификации типов диаграмм изотермического деформирования сплавов с эффектом памяти формы в зависимости от температуры деформирования.

**Методология исследования.** Рецензент согласен с предложенной в диссертации краткой формулировкой методологии исследования и не видит смысла ее повторять. В качестве позитивного дополнения считаю необходимым отметить методику восстановления материальных функций по виду экспериментальных кривых деформирования, убедительно представленную автором во второй главе.

К числу наиболее значимых **результатов**, на мой взгляд, относятся:

- экспериментальное обоснование основной гипотезы, позволяющей строить модель без разделения вкладов структурной и фазовой составляющих в одноосную деформацию ориентированного мартенсита;
- методика восстановления трех материальных функций на основе экспериментальных данных о кривых деформирования;
- алгоритм расчета одноосной деформации в развитой феноменологической модели;
- демонстрация возможностей модели при описании монотонного и реверсивного эффектов памяти формы, а также при анализе зависимостей параметров конструкции из пакета одинаковых стержней от температуры и деформации;
- выявление дополнительных вариантов диаграмм изотермического деформирования сплавов с эффектом памяти формы в зависимости от температуры деформирования.

Кроме того, оппонент отмечает высокое качество литературного обзора , логическую стройность изложения материала и понимание автором работы перспектив дальнейших исследований.

Достоверность результатов работы не вызывает сомнений. Положения, лежащие в основе феноменологической модели, базируются на результатах специально выполненных экспериментов, а результаты расчетов в рамках развитой модели хорошо согласуются с наблюдаемыми в поликристаллических образцах сплавов с памятью формы макроэффектами. Существенную роль сыграла и критически осмысленная постановка цели исследования. В результате, модель внутренне непротиворечива и приводит к согласию с результатами, полученными с помощью других аттестованных моделей, известных по литературным данным.

Оппонент подтверждает **теоретическую и практическую значимость** работы, связанную с разработкой модели, сочетающей сравнительную простоту с достаточной полнотой описания макромеханических явлений в сплавах с эффектом памяти формы. Несомненно, заслуживают внимания уточнения методики определения материальных функций по экспериментальным диаграммам  $\sigma$ - $\epsilon$  для прямого мартенситного превращения и мартенситной неупругости, а также классификации типов диаграмм изотермического деформирования в зависимости от температуры деформирования.

Диссертация, на мой взгляд, свободна от каких-либо существенных недоработок, тем не менее, полезно прояснить мнение автора **по ряду формулировок и вопросов:**

## 1. О терминологии.

- Использование термина «мартенситный элемент», подразумевающего одновременное возникновение совокупности мартенситных кристаллов однородно распределенных в объеме образца, носит излишне искусственный характер.
- Определение «универсальная» применительно к развитой теории (несмотря на разъяснения его условности) представляется избыточным.
- Гипотеза, подтвержденная экспериментом, становится постулатом.

## 2. Об аксиоматике.

- «Гипотеза 2» об обратном порядке исчезновения мартенситных кристаллов при нагреве (которое не всегда, но, как правило, имеет место в сплавах с эффектом памяти формы), соответствует идеальному случаю строгой обратимости мартенситного превращения.
- Перед изложением алгоритма модели было бы целесообразно кратко перечислить все утверждения и соотношения, принимаемые в дальнейшем в качестве аксиом (существование функциональных зависимостей свойств материала от доли мартенсита, правило «смеси», температурная зависимость доли мартенсита...).

3. Говоря о перспективах, автор, естественно, указывает на переход к трехмерной модели. Что автор может сказать о возможности

модифицировать модель применительно к монокристаллам никелида титана, сохраняя для простоты одноосный характер нагрузки ?

Разумеется, приведенные уточнения, пожелание и вопрос ни в коей мере не ставят под сомнение высокую оценку диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно представлены в научной печати в виде 12 научных публикаций, включая 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК и 2 статьи в журналах, входящих в базу Scopus. Оппонент подтверждает точность приведенных в диссертации ссылок на работы автора.

Работа прошла достаточную апробацию, ее результаты доложены на 10 представительных российских и международных научных конференциях.

Работа написана хорошим языком и тщательно отредактирована (впервые в своей практике при внимательном чтении диссертации оппонент не обнаружил опечаток), логика изложения материала соответствует поставленным целям.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

## Заключение

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, включая две целевые позиции формулы специальности: «установление законов деформирования, повреждения и разрушения материалов;... планирование, проведение и интерпретация экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов», а также три позиции области исследования: п.2 «Теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой», п.8 «Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования» и п.9 «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях». Работа удовлетворяет критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным п. 9 **«Положения о порядке присуждения ученых степеней»**, утвержденного Правительством РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. На использованные в диссертации результаты других авторов диссертантом в работе даны соответствующие ссылки. Личный вклад автора в диссертационную работу у оппонента не вызывает сомнений. Замечу, что в опубликованных по диссертации работах соавторов нет.

Автореферат соответствует содержанию и основным научным положениям.

Диссертация К. А. Тихомировой «Феноменологическое моделирование процессов фазового и структурного деформирования сплавов с памятью формы. Одномерный случай», является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты, хорошо известные научной общественности.

Считаю, что автор диссертации Ксения Алексеевна Тихомирова несомненно **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Официальный оппонент доктор физ.- мат. наук, профессор,

заведующий кафедрой физики



*M.Kashen*

Кашенко Михаил Петрович

20 сентября 2018г

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»

620100, Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37

Тел.: 8 (343)-254-65-06, E mail:[general@usfeu.ru](mailto:general@usfeu.ru)