ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Тихомировой К.А. на тему
«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.

Работа посвящена актуальной теме экспериментального исследования и теоретического моделирования уникальных свойств и эффектов, характерных для сплавов с памятью формы (СПФ) типа никелида титана в рамках подходов и методов механики деформируемого твердого тела. Несмотря на большое количество публикаций по данной тематике, целый ряд вопросов, связанных с поведением СПФ не получил окончательного и общепризнанного решения. Очевидна потребность в таких моделях поведения СПФ, которые, с одной стороны, количественно и качественно правильно описывали бы как можно более широкий круг термомеханических эффектов и явлений, присущих СПФ, а с другой стороны, были бы не слишком сложны и поэтому применимы к решению важных с практической точки зрения краевых и начально – краевых задач для элементов конструкций, содержащих СПФ. Именно создание такого типа модели является целью рецензируемой диссертации.

Первый раздел работы носит обзорный характер. В нем кратко изложены основные термомеханические свойства СПФ и уникальные эффекты, характерные для этих материалов. Там же перечислены и известные модели термомеханического поведения СПФ, которые можно отнести к разряду феноменологических или микромеханических. Сформулированы разумные требования к феноменологическим моделям поведения СПФ, в рамках которых проводится исследования, описанные в данной диссертации.

Вторая глава диссертации, согласно ее названию, должна содержать описание проведенных автором экспериментальных исследований термомеханического поведения СПФ. Однако первые два параграфа этой главы связаны с теоретическими исследованиями, причем несут очень важную смысловую нагрузку. В этих параграфах четко сформулирована гипотеза о том, что вся предшествующая история термомеханического нагружения мартенситного представительного объема СПФ влияет на процесс его последующего термомеханического деформирования только через значение девиатора фазово – структурной деформации, накопившейся в этом представительном объеме в процессе предварительного термомеханического нагружения. Вообще говоря, в некоторых публикациях, посвященных моделированию поведения СПФ эта гипотеза предполагалась неявно. Предполагалось, в частности, что независимыми

дополнительными термодинамическими параметрами СПФ являются параметр фазового состава q и девиатор фазово – структурной деформации $\varepsilon_{ij}^{phst\,\prime}$, что, фактически, эквивалентно сформулированной выше гипотезе. Однако четкая формулировка данной гипотезы дана в рецензируемой диссертации впервые. Получено важное следствие – температурный мартенсит и мартенсит напряжений при условии одинаковых значений девиатора фазово – структурных деформаций в смысле реакции на последующее термомеханическое нагружение между собой никак не различаются.

В последующих параграфах главы 2 описаны методики проведения и результаты экспериментальных исследований, проведенных в работе. Среди полученных результатов необходимо отметить следующие. Установлено совпадение кривых доориентации мартенсита для образцов, с одинаковыми начальными деформациями, полученными в процессе мартенситной неупругости и прямого превращения под действием постоянного напряжения. Тем самым, получено подтверждение сформулированной выше гипотезы. На основании результатов проведенных экспериментов высказано весьма смелое предположение о том, что диаграмма мартенситной неупругости может быть получена из диаграммы прямого превращения путем сдвига вдоль оси напряжений на величину порогового напряжения для явления мартенситной неупругости. Это предположение, несомненно, обладает научной новизной и может быть использовано в качестве первого приближения. В той же главе приведены полученные экспериментально диаграммы прямого превращения и мартенситной неупругости. Следует отметить, что по оси деформаций в соответствующем графике отложена на достигнутая после разгрузки деформация, как это делается в некоторых работах, а деформация, возвращаемая после нагрева через интервал температур обратного превращения, которая является по сути фазово – структурной и не содержит невозвращаемой пластической части.

Следует особо отметить полученный результат несовпадения диаграмм прямого превращения и мартенситной неупругости (рис. 2.4) при использовании в качестве одной из координат величины эквивалентных напряжений. На самом деле, этот результат свидетельствует вовсе не о нарушении основной гипотезы эквивалентности фазового и структурного превращения, а о том, что принята слишком грубая гипотеза о том, что диаграмма мартенситной неупругости может быть получена из диаграммы прямого превращения путем сдвига вдоль оси напряжений на величину порогового напряжения для явления мартенситной неупругости.

Интересен полученный в том же разделе вывод о том, что наличие структурной деформации изменяет температуру A_s и не меняет температуру A_f. Этот результат

кажется совершенно естественным, поскольку при температуре окончания обратного превращения фазово - структурная деформация снимается за счет явления памяти формы и никак не может влиять на температуру A_f. Этот вывод подтверждается также обнаруженным в диссертации совпадением значений A_f, определяемым по диаграммам зависимости реактивных напряжений от температуры для случаев, когда начальная деформация получается при прямом фазовом превращении и при нагружении в режиме мартенситной неупругости.

Третья глава работы посвящена формулировке одномерной модели деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях. Введено понятие «управляющего напряжения», фазово-структурная деформация определяется интегральным соотношением (3.1), которое, за счет использования понятия управляющего напряжения, учитывает развитие неупругих деформаций, как за счет фазового, так и за счет структурного переходов. Данная модель, несомненно, обладает научной новизной. Изложен приближенный способ распространения модели на случай, учета разносопротивляемость СПФ. Предложен вариант учета влияния действующих напряжений на характерные температуры фазовых переходов в СПФ. Предложена структурная модель в виде цепочки одномерных мартенситных элементов, степень ориентированности которых определяется их наклоном. Новизна этой модели несомненна.

Глава 4 диссертации посвящена апробации предложенной модели, описанию различных эффектов, характерных для СПФ в случае однородных напряженно - деформированных состояний. Продемонстрировано качественно правильное описание явления монотонной памяти формы после предварительного деформирования в режиме накопления деформации прямого превращения при постоянном напряжении или мартенситной неупругости; явление накопления деформаций прямого превращения под действием кусочно - постоянной нагрузки, когда напряжение при переходе с первого этапа процесса на второй уменьшается (не до нуля); эффекта реверсивной памяти формы. В том же разделе в дважды связанной постановке решена модельная задача о деформировании пакета стержней, находящихся в неравномерном температурном поле и испытывающих прямое и обратное мартенситные превращения. Необходимо отметить, что решение задач о термомеханическом поведении СПФ в дважды связанной постановке является непростой проблемой. Поэтому известно очень мало такого типа решений.

Пятая глава диссертации посвящена применению разработанной в диссертации модели к построению диаграмм изотермического деформирования СПФ при одноосном

растяжении, разгрузке и последующем нагреве через интервал температур обратного мартенситного превращения. Полученные диаграммы качественно правильно отражают известные экспериментальные данные, что свидетельствует о достоверности предложенной модели деформирования СПФ.

Заключение содержит общие выводы из результатов проделанной работы и краткие рекомендации по поводу возможных дальнейших исследований.

Замечания по тексту диссертации

1. На стр. 18 описано явление реверсивной памяти формы и приведен график изменения деформации в ходе этого процесса (рис. 1.2). При этом рассмотрен лишь случай, когда пик деформации, наблюдаемой на этапе обратного превращения, всегда направлен в ту же сторону, что и пик деформации на этапе предварительного прямого превращения. На деле это не всегда так. В литературе описаны случаи, когда пик деформации на этапе обратного превращения направлен в сторону, противоположную пику деформации на кривой прямого превращения.
2. На рис.2.1 диаграмма мартенситной неупругости изображена "слишком схематически" в виде кривой, выпуклой вверх (вдоль оси деформаций) но начинающейся не из начала координат, а из некоторой точки оси напряжений с абсциссой, равной напряжению, с которого начинается структурное превращение. На деле многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что диаграмма мартенситной неупругости не является кривой с неизменным знаком второй производной, но содержит точку перегиба или даже горизонтальный участок. Более того, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что процесс структурного превращения начинается с самого начала процесса нагружения, т.е. диаграмма мартенситной неупругости начинается из начала координат на плоскости $\sigma \div \varepsilon^{st}$. Линейно - упругий участок в начале диаграммы мартенситной неупругости отсутствует.
3. На стр. 42 имеется фрагмент: $F_1(\sigma_1) = F_2(f(\sigma_2)) = F(\sigma)$ где $F(\sigma)$ – 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, как это следует из экспериментальных данных [125]. На самом деле эта конструкция выглядит весьма естественно как раз для случая отсутствия предела структурного деформирования, для которого обе диаграммы выходят из начала координат, но не совпадают.

4. 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 $\delta V = (V - V_0)/V_0$, или так называемая линейная (одномерная) деформация, соответствующая объемной, которая в 3 раза меньше. Насколько мне известно, величина 0.34% соответствует, как раз величине δV. В результате возникает вопрос о корректности сравнения величины $\varepsilon_V = 0.34\%$ с деформацией $\varepsilon_0 = 0.3\%$, проводимого на стр. 58, ведь ε_0, насколько можно понять, это линейная, (осевая) деформация. Если учесть, что линейная деформация объемного эффекта фазового перехода составляет $\varepsilon_V/3 \approx 0.1\%$, то деформация обратимой памяти формы получается порядка 0.2%, а вовсе не близка к нулю.
5. Вызывают вопросы результаты, полученные в параграфе 2.3.5, связанные с аппроксимацией полученных в эксперименте диаграмм обратного фазового перехода формулой (2.6), см. рис. 2.6. Автор считает полученные результаты отрицательными, не подтверждающими гипотезу об эквивалентности деформированного состояния СПФ, созданного с помощью прямого превращения и с помощью нагружения в режиме мартенситной неупругости. На деле полученный результат свидетельствует лишь о том, что аппроксимация (2.6) не годится для описания рассматриваемого фазового перехода! Дело в том, что аппроксимация (2.6) дает кривую, симметричную относительно точки $T = 0.5(A_s + A_f)$, $q = 0.5$, тогда как аппроксимируемые экспериментальные диаграммы явно не симметричны относительно этой точки. Поэтому и получилось столь разительное отличие экспериментальных диаграмм и аппроксимирующих эти диаграммы кривых. Надо было бы использовать известные несимметричные аппроксимации.
6. Основной недостаток предложенной в диссертации модели деформирования СПФ заключается в том, что эта модель не описывает явления ориентированного превращения (продолжения деформирования в сторону ранее приложенного напряжения после его снятия при продолжении прямого превращения). Связан этот недостаток с тем, что модель учитывает явление зарождения мартенситных элементов при прямом фазовом превращении, но не учитывает эффект их развития при продолжении прямого превращения. Следует пожелать диссертанту учесть этот эффект в процессе дальнейшего усовершенствования модели.

Сформулированные замечания не изменяют общего положительного отношения к работе, поскольку они частично относятся к форме изложения материала в диссертации, а частично могут рассматриваться как пожелания к дальнейшим исследованиям. Диссертация является законченной научной работой, посвященной тематике, актуальной, как в фундаментальном, так и в прикладном отношении, обладающей высокой степенью научной новизны. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением теоретических положений с экспериментальными данными, полученными диссертантом и другими исследователями. Полученные в диссертации результаты и методы их получения достаточно подробно изложены в 12 печатных работах ее автора. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Резюмируя все сказанное выше можно утверждать, что рецензируемая работа удовлетворяет всем требованиям, установленным Положением «О порядке присуждения учёных степеней», а ее автор, Тихомирова К.А., заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико - математических наук.

Официальный оппонент
Профессор, д.ф.-м. н., Мовчан Андрей Александрович
главный научный сотрудник Тел. 8(495)945-17-77
Федерального государственного e-mail: movchan47@mail.ru
бюджетного учреждения науки
Института прикладной механики
Российской академии наук
125040, Москва, Ленинградский
проспект, д.7, стр. 1

Подпись А.А. Мовчана удостоверяю
Ученый секретарь ИПРИМ РАН Ю.Н. Карнет

15.09.2018