

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Саганова Евгения Борисовича на тему:

«Разработка методов анализа термомеханического поведения элементов конструкций, содержащих сплавы с памятью формы, работающих на кручение», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Работа Е.Б. Саганова посвящена обоснованию аналитических и численных методов расчета напряженно-деформированного состояния в цилиндрических образцах и элементах конструкции из сплава с памятью формы (СПФ), подверженных воздействию крутящего момента и температурных градиентов. Материалы эти – дорогие, они используются в медицинских приложениях, в ответственных термонагруженных элементах конструкций (в том числе, в аэрокосмических приложениях), и получение достоверных данных об их поведении в опытах и модельное обоснование особенностей их деформирования, безусловно, является актуальной задачей.

Актуальность темы диссертационной работы. Сплавы с памятью формы обладают рядом уникальных свойств, что позволяет использовать их при создании устройств, основанных на новых физических принципах. Наиболее эффективными по уровню обратимой деформации можно считать механизмы, работающие на кручение. К ним относятся торсионные актуаторы и силовозбудители крутящего момента, рабочее тело которых представляет собой полую трубку или стержень сплошного круглого поперечного сечения из СПФ. Кроме того, использование СПФ эффективно в механизмах сейсмо-безопасности, применяемых для рассеивания механической энергии. Такие устройства имеют ощутимые весовые и энергетические преимущества по сравнению с механизмами из традиционных конструкционных материалов.

Большинство работ по СПФ были посвящены экспериментам и построению моделей термомеханического поведения этих материалов. Краевые задачи и методы их аналитического или численного решения применительно к СПФ рассматривались значительно реже. Это объясняется сложностью определяющих соотношений и необходимостью связанного термомеханического анализа. Уравнения связи внутренних параметров для СПФ в общем случае имеют дифференциальный вид и не могут быть проинтегрированы без знания термомеханического пути деформирования.

Учитывая вышеизложенное, разработку методов аналитического и численного решения краевых задач механики СПФ можно считать актуальной задачей механики деформируемого твердого тела. Данному вопросу – на примере кручения – и посвящена рецензируемая диссертационная работа, результаты которой могут быть успешно использованы при проектировании активных элементов управления аэродинамическими поверхностями перспективных летательных аппаратов. Разработанные алгоритмы решения ряда краевых задач могут стать основой для разработки общих методов расчета конструкций, содержащих СПФ и работающих при различных термосиловых условиях нагружения. Это определяет практическую и фундаментальную ценность данной диссертационной работы.

Разумеется, основная **практическая значимость** состоит в отработке методики и использовании результатов сложных испытаний, но компьютерное моделирование (точнее, расчеты НДС) позволяют обосновать предлагаемые технические решения и сократить процедуру эмпирического поиска. **Достоверность результатов** (а точнее – адекватность модели, так как сами расчеты выполнены корректно) проверяется качественным согласием с экспериментом и с точными аналитическими решениями.

Содержание. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения и списка используемой литературы.

Во **введении** дан краткий обзор работ и указаны сведения, подтверждающие соответствие диссертации основным формальным требованиям по: степени разработки темы исследования, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, методологии и методам исследования. Изложены выносимые на защиту положения и обоснование достоверности результатов. Раскрывается место диссертационной работы среди исследований, посвященных СПФ. На основе обзора современного состояния работ, посвященных решению краевых задач механики СПФ, отмечено, что большинство подобных работ посвящено изучению явления сверхупругости в изотермической постановке. Рассмотрение неизотермических процессов, протекающих в СПФ, проводилось значительно реже.

Глава 1 представляет аналитический обзор моделей деформирования сплавов с памятью формы. Особое внимание уделено феноменологической группе моделей. Рассмотрены определяющие соотношения в таких моделях и установлены границы их применимости. Обоснован выбор модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях в качестве базы для решения поставленных краевых задач механики СПФ. Из этой главы следует, в чём состоит новизна модели неизотермического деформирования, используемой в дальнейших главах работы.

Во **второй главе** рассмотрена базовая задача об изотермическом кручении в режиме мартенситной неупругости. Рассмотрение данной краевой задачи имитирует процесс задания актуатору из СПФ предварительной деформации (холостой ход), которая будет сниматься при последующем нагреве (рабочий ход). В рамках рассматриваемых задач справедливо положение об активных процессах пропорционального нагружения (АППН), что позволяет проинтегрировать определяющие соотношения и получить аналитическое решение, сводящееся к системе алгебраических уравнений. Три пункта главы 2 посвящены, последовательно, кручению: тонкостенной трубки, толстостенной трубы и сплошного цилиндрического стержня. Последний случай в последующих главах не выделяется, так как представляет частный случай толстостенной трубы с нулевым внутренним радиусом. Поскольку, по аналогии с упругим случаем, крутильная жесткость пропорциональна четвертой степени радиуса, уже при внутреннем радиусе, составляющем половину (и менее) от наружного, отличие по жесткости от сплошного стержня невелико (порядка 1/16). На первых модельных задачах апробированы основные гипотезы: плоских сечений и отсутствия депланаций. Ради этих упрощающих гипотез, собственно, и выбраны в качестве объектов цилиндрические трубы. Насколько усложнятся решения для стержней произвольного сечения? – вопрос остаётся открытым. Уже в базовой постановке вводится функция распределения интенсивности микронапряжений типа Вейбулла, позволяющая в статистическом аспекте учитывать особенности структуры сплава.

Глава 3 (и далее – по возрастанию сложности моделей) посвящена решению неизотермической задачи о прямом термоупругом мартенситном фазовом превращении, протекающем в тонко- и толстостенной трубке при постоянном крутящем моменте. И снова, п. 3.1 посвящён задаче о тонкостенной трубке, деформируемой в условиях АППН, а п. 3.2 – гораздо более сложной задаче о кручении толстостенных трубок или сплошных стержней из сплава с памятью формы. Данные задачи рассматриваются в предположении, что процесс охлаждения протекает достаточно медленно, и температура образца успевает выровняться по сечению. При рассмотрении простейшего варианта задачи об охлаждении тонкостенной трубки из СПФ при фиксированном крутящем моменте удается получить аналитическое решение, которое в дальнейшем используется для определения достоверности результатов при предельном переходе от толстостенной трубки к тонкостенной. В задаче о прямом переходе в толстостенной трубке и стержне не удается получить аналитическое решение, так как в сечении возникают три характерные области (1. упругая, 2. протекания фазово-структурного перехода и 3. завершённого фазового перехода), границы которых заранее неизвестны и определяются только в процессе численного решения задачи. Кроме того, в процессе охлаждения в поперечном сечении образцов из СПФ наблюдается существенное перераспределение напряжений.

В главе 4 решаются неизотермические задачи об обратном термоупругом мартенситном фазовом превращении в тонкостенных трубках (п. 4.1) и в толстостенных трубках и стержнях (п. 4.2) под действием постоянного и переменного крутящего момента. В п. 4.3 решается интересная и практически важная задача об обратном термоупругом превращении в сплошном цилиндре при наличии упругого контртела, которая наиболее важна с технической точки зрения. Конец цилиндра либо закреплён, либо связан с упругим цилиндром такого же диаметра, поэтому момент становится пропорциональным углу закручивания. Такая постановка близка к условиям работы реальных торсионных актуаторов, пружин и силовозбудителей крутящего момента. Взаимодействие активного элемента из СПФ и упругого контртела обеспечивает создание при термоциклировании конструктивного эффекта многократно обратимой памяти формы. Задачи главы 4 решаются в предположении о достаточно медленных процессах нагрева, когда температура успевает выровняться по сечению.

Глава 5 посвящена решению задачи о кручении в наиболее сложной постановке, которую удалось исследовать только в тонкостенном приближении, в предположении об отсутствии градиентов напряжений и температуры по толщине трубки. В рамках модели изотермического кручения в п. 5.1 удалось описать «сверхупругое» поведение сплава с учетом значительных фазово-структурных деформаций. В п. 5.2 решается наиболее сложная (из доступных в рамках данного подхода) задача о неизотермическом кручении в режиме сверхупругости. Данное свойство СПФ может быть эффективно использовано для гашения колебаний и рассеивания механической энергии. Моделирование поставленной задачи выполнено в наиболее полной, дважды связанной термомеханической постановке. При решении задачи учтено влияние действующих напряжений и деформаций на характерные температуры фазовых переходов, а также влияние параметра фазового состава, в качестве которого выступает объемная доля мартенситной фазы, на актуальную температуру трубки из СПФ. Кроме этого, учтены диссипативные явления, связанные как со структурным, так и с фазовым превращением, выделение и поглощение латентного тепла фазового перехода, а также

теплообмен с окружающей средой. На первом шаге в уравнении энергетического баланса не учитывается механическая диссипация, связанная с фазовым и структурным переходами. В первой модели связь параметра фазового состава с температурой предполагается линейной. В модели второго уровня учитывается нелинейное влияние внешних напряжений на температуры фазового перехода. В третьей модели используется нелинейная аппроксимация диаграммы фазового перехода. И наконец, в четвертой модели учитываются диссипативные члены в уравнении энергетического баланса. Анализ последовательности моделей позволяет утверждать, что корректное описание явления сверхупругости возможно, именно, при неизотермической, дважды связанной постановке задачи. При изотермической постановке нарушаются оценки напряженно-деформированных состояний в изделиях из сплавов с памятью формы.

Результатом компьютерного моделирования нового класса задач о фазовых и структурных переходах при неизотермическом кручении можно считать не только создания расчетных алгоритмов и программ, не только получение конкретных расчетных зависимостей, но и выяснение многих качественных особенностей деформирования СПФ, которые необходимо учитывать при проектировании силовых изделий, работающих на кручение: активаторы, возбудители крутящего момента, пружины, поглотители энергии.

Достоверность полученных результатов основывается на использовании при решении рассматриваемых задач модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, которая наиболее полно и точно описывает широкий круг явлений, характерных для этих сплавов. Данная модель апробирована ранее, и результаты, получаемые в рамках этой модели, подтверждаются имеющимися в открытом доступе экспериментальными данными. Кроме того, достоверность приведенных решений, которые имеют вид систем дифференциальных уравнений, (задачи глав три и четыре), подтверждается сходимостью результатов моделирования к аналитическому решению, полученному предельным переходом для частных случаев.

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что решения краевых задач для системы определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях получены **впервые**.

Впервые получено решение задачи об изотермическом кручении стержней и трубок из СПФ в мартенситном фазовом состоянии с учетом упругих деформаций. Установлено, что с ростом крутящего момента растет влияние упругих деформации на решение задачи.

Впервые в рамках модели нелинейного деформирования СПФ рассмотрена неизотермическая задача о прямом переходе в стержнях и трубках из СПФ. Решение получено в однократно связанной термомеханической постановке с учетом влияния действующих напряжений и деформаций на характерные температуры фазового перехода. Кроме того, учитывается возможность раздвойнивания мартенситных элементов, что проявляется накоплением при охлаждении не только фазовой, но и структурной деформации. Установлено, что при охлаждении образца из СПФ происходит перераспределение напряжений по его сечению. При этом внутренняя часть сечения разгружается, а при некотором значении крутящего момента - и вовсе выключается из работы. Внешняя часть сечения, напротив, испытывает значительные перегрузки в процессе охлаждения. Учет структурного превращения существенно меняет картину распределения напряжений, и наблюдается разгрузка внешних слоев

образца из СПФ. Данные особенности поведения необходимо учитывать при проектировании изделий из СПФ, работающих на кручение.

Впервые получено решение задачи об обратном термоупругом мартенситном фазовом превращении, протекающем в стержнях и трубках из СПФ под действием постоянного и переменного крутящего момента. Моделирование выполнено в однократно связанной термомеханической постановке. Получено новое решение, которое учитывает возможность структурного перехода при обратном превращении. Установлено, что в процессе нагрева напряжения меняются по сечению образца из СПФ немонотонно, при этом максимальный уровень напряжений отмечается не в конечной точке процесса, как это считалось в рамках традиционных постановок задачи, а в момент, когда в сечении можно выделить как аустенитную, так и мартенситную фазы. Расчеты по модели показали, что при нагреве образца из СПФ в значительной степени перегружается внутренняя часть сечения. Учет структурного перехода при решении задачи предсказывает значительную разгрузку внутренней части сечения.

Впервые получено решение дважды связанной задачи о кручении тонкостенной трубки из СПФ в режиме сверхупругости. Традиционные постановки задачи не учитывали влияние действующих напряжений и деформаций на температуры фазовых переходов и обратного влияния фазового состава на температуру трубки. Учтены в первом приближении диссипативные эффекты, а также выделение и поглощение латентного тепла фазового перехода, конвективный теплообмен с окружающей средой. Расчеты по данной модели проведены для различных значений: скорости нагружения, коэффициента теплообмена с окружающей средой и начальной температуры трубки из СПФ.

Замечания по рецензируемой диссертационной работе.

В порядке замечаний и обсуждения хотелось бы высказать следующие соображения:

1. Обращает внимание, что автор недостаточно четко разделяет объект (никелид титана и др. СПФ) и предмет (уточненные модели прямого и обратного мартенситного перехода) исследования. Они не всегда обязаны совпадать. Сам данный сплав (и другие, ему подобные) могут обладать такими тонкими особенностями неизотермического поведения, которые не учтет ни одна модель. И в то же время разработанные методы анализа относятся именно к возможности работать со сложными, неоднозначными диаграммами деформирования, и в этом смысле предмет «шире» объекта. В основных выводах, однако, всё время просматривается предсказание поведения объекта, следующее из сложных построенных зависимостей. Но это – лишь результат компьютерного моделирования. Можно ожидать, что реальный объект поведет себя подобным образом, но обоснование такого рода эффектов есть задача и результат отдельных специальных экспериментов, которые в работе лишь упоминаются.

2. В качестве модельных элементов конструкции в работе выбраны лишь тонко- и толстостенные трубы (в пределе – сплошные стержни). При их кручении не возникает депланации сечения и предполагается линейный рост деформаций по толщине стенки. Хотелось бы, чтобы автор уточнил: такие допущения принципиально ограничивают класс объектов или выбраны только для упрощения и без того достаточно сложной

задачи? Какие принципиальные изменения в алгоритмах решения потребуются при дальнейшем отказе от этих гипотез для стержней другого сечения?

3. Все главы (2-4) состоят фактически из трех разделов, посвященным тонкостенным трубам с постоянной деформацией, толстостенным трубам и сплошным стержням (как частному случаю толстостенной трубы). А в главе 5 автор остановился лишь на тонкостенном приближении. Естественно, тонкостенная труба наиболее эффективна, если исключить потерю устойчивости при кручении (которая в работе не упоминается), но следовало бы пояснить: более общая постановка задачи, сформулированная в главе 5, применима к случаю неоднородной деформации в толстостенной трубе или в стержне? Примененное ограничение связано лишь с необходимостью допустимого упрощения или оно принципиально, и явление сверхупругости не может быть описано для более сложных, чем тонкостенная трубка, объектов?

4. В решении ряда рассматриваемых задач фигурирует интегральная функция F_1 распределения интенсивности микронапряжений в аустенитном фазовом состоянии, при этом в работе не отмечено, каким образом подбирается вид данной функции. Использование статистических разбросов локальных свойств сплавов на основе распределений типа Вейбулла (или Гаусса, или Пуассона, или Лапласа и т.д.) позволяет объяснить и качественно описать некоторые особенности поведения (в частности, масштабный эффект). Но принципиальным камнем преткновения всех статистических гипотез является вопрос выбора характерного размера структуры (это не зерно, не кристаллит, не волокно, а некоторый феноменологический параметр), а также – вопрос определения локальных (случайных) свойств. В работе строятся серии зависимостей для разных параметров распределения Вейбулла, но не обсуждается сложная проблема их экспериментальной идентификации.

5. При рассмотрении задачи о мартенситной неупругости для толстостенных трубок отмечено, что кривые мартенситной неупругости и эпюры напряжений, полученные для разных значений параметра α , но одного значения σ_0 пересекаются в одной точке, соответствующей значению безразмерных напряжений $s = \sigma_0$. Утверждение сильное, но не дано качественное объяснение данного явления.

6. При рассмотрении задачи о сверхупругом поведении тонкостенной трубки из СПФ при кручении считается, что происходит свободный конвективный теплообмен с окружающей средой, но в реальных условиях эксплуатации это трудно осуществить. Каким образом можно учесть вынужденную конвекцию с воздухом?

7. Чисто редакционно. В автореферате на рисунках приведены (как обычно и делается) те же серии рассчитанных зависимостей, что и в тексте диссертации. Но если в диссертации они уместны и подробно обсуждаются, то в автореферате рисунки 2, 4, 7, 8, 10, 11 выглядят явно перегруженными кривыми, число которых для прояснения качественной картины можно было бы сократить вдвое. Тем более, что подписей к рисункам нет, и краткие пояснения приходится искать в тексте. (Пункты (1.3, 3.2, etc.) иногда называются разделами, иногда параграфами, что несколько смущает неискушенного читателя.)

Вышеприведенные замечание и обсуждения отражают лишь пожелание улучшить в дальнейшем обоснование и изложение проблем и не снижают общую положительную оценку работы. В целом – диссертация представляет собой законченное исследование, содержащее все необходимые признаки квалификационной работы. Результаты работы – интересные, связанные с обоснованием и применением новых механических моделей,

и в то же время - нацеленные на решение практически важных задач проектирования изделий из сплавов с памятью формы. Работа выполнена на высоком, современном научном уровне, не уступающем мировому, и во многом превосходящем его.

Заключение. Диссертационная работа Саганова Е.Б. выполнена на высоком научном уровне, полученные результаты имеют важное прикладное значение, достоверность результатов достаточно обоснована. Автореферат полностью соответствует содержанию. Пятнадцать публикаций автора, шесть из которых в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ, достаточно полно отражают ее содержание. Приведенные замечания не снижают научно-технической значимости полученных решений и результатов. Таким образом, можно заключить, что рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет всем критериям, установленным Положением «О порядке присуждения учёных степеней», а ее автор Саганов Е.Б. за аналитическое и компьютерное моделирование процессов неизотермического деформирования сплавов с памятью формы заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией безопасности и
прочности композитных конструкций
ФГБУН Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН,
г. Москва

Полилов Александр Николаевич

101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер,
д. 4
Телефон: 8 (495) 628-87-30, 8 (499) 135-34-30
e-mail: polilovan@mail.ru; 8(905) 556-75-03

Подпись Полилова Александра Николаевича заверяю:

Заместитель директора по управлению персоналом
ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук



Э.Н.Петюков