

"Утверждаю"
Генеральный директор ОАО НИАТ
Д.т.н., профессор Плихунов В.В.
ноября 2016 г.



Отзыв ведущей организации ОАО «Национальный институт авиационных технологий» на диссертацию 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

Сплавы с памятью формы (СПФ), благодаря своим уникальным термомеханическим свойствам могут использоваться для создания уникальных устройств и прогрессивных технологий. Широкое внедрение этих материалов сдерживается отсутствием методов, алгоритмов и программ для достоверного анализа поведения элементов конструкций, содержащих такие материалы. Во многих коммерческих комплексах прикладных программ по расчету на прочность анонсируется возможность анализа термомеханического поведения элементов из СПФ. Однако попытки решения с помощью этих комплексов краевых задач термомеханики для элементов из СПФ часто приводят к неадекватным результатам, особенно для неизотермических процессов в случае неоднородных напряженно-деформируемых состояний. Решения тестовых задач для СПФ, с помощью которых можно было бы проверить достоверность получаемых в рамках коммерческих программных комплексов результатов для неизотермических проблем при неоднородном напряженно - деформируемом состоянии, отсутствуют.

В силу сказанного выше актуальной научно-технической задачей является разработка методов аналитического и численно-аналитического анализа термомеханических задач для элементов из СПФ, решения которых могли бы использоваться, в том числе, как тестовые, для проверки результатов, получаемых для СПФ с помощью известных коммерческих программных комплексов. Решению данной проблемы и посвящена рецензируемая диссертация.

Одним из перспективных направлений использования СПФ является создание силовозбудителей (актуаторов) с рабочими телами из этих материалов, поскольку по значению отношения полезной работы или генерируемого силового воздействия к объему

или массе изделия из СПФ не имеют себе равных среди изделий из других адаптивных материалов. В частности, широкое применение могут иметь торсионные актуаторы, генерирующие достаточно высокие значения крутящих моментов. В рецензируемой диссертации проведен анализ поведения рабочих тел таких силовозбудителей путем решения соответствующих краевых задач термомеханики для СПФ. В этом состоит прикладное значение диссертации. Полученные в ней результаты могут быть использованы в таких организациях, как ЦАГИ, «НПО им. С.А. Лавочкина», ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева, ФГБУН Институт прикладной механики РАН, ОАО НИАТ, ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», ФГБУН Институт машиноведения им. А.А.Благонравова, МГТУ им. Н.Э.Баумана, и др.

Достоверность многих из полученных в работе решений определяется их аналитическим характером. В случае таких общих постановок, для которых не удалось получить аналитических решений, проверка проведена путем сравнения результатов численно-аналитических решений с предельными частными случаями, для которых аналитические решения были найдены.

Сложность проблемы описания термомеханического поведения элементов из СПФ связана с чрезвычайным разнообразием и аномальным характером многих свойств этих материалов. Адекватность получаемых решений определяется правильностью описания всех этих свойств в рамках системы определяющих соотношений для СПФ, для которой строятся эти решения. В данной диссертации рассмотрение ведется на основе системы определяющих соотношений новой модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, в рамках которой количественно и качественно правильно описывается весьма широкий круг свойств и явлений, характерных для СПФ. Такой выбор системы определяющих соотношений также свидетельствует в пользу достоверности полученных в работе результатов.

Получить аналитические решения столь сложных задач удалось за счет использования общих теорем механики СПФ. В частности использовались положения об активных процессах пропорционального нагружения СПФ, что позволило свести некоторые задачи к решению алгебраических уравнений.

В диссертации впервые получено решение связанных задач о прямом и обратном мартенситном превращении в стержне круглого поперечного сечения и трубке кольцевого поперечного сечения из СПФ в предположении о равномерном распределении по сечению температуры, что соответствует достаточно медленным процессам охлаждения и нагрева, при которых температура точек сечения успевает выравниваться. Впервые установлено, что в рамках модели нелинейного деформирования СПФ при прямом превращении

происходит существенное перераспределение напряжений по сечению, почти полная разгрузка внутренних частей тела и существенная перегрузка внешних слоев. Последний факт весьма важен для расчетов на прочность рабочего тела силовозбудителя, поскольку перегрузка наблюдается в низкопрочном мартенситном состоянии СПФ. Впервые установлено, что максимальные напряжения при обратном мартенситном превращении, т.е. для рабочего хода силовозбудителя, наблюдаются не в последней точке обратного перехода, а в некотором промежуточном двухфазном состоянии. Впервые решена дважды связанная задача о сверхупругом поведении трубки из СПФ при ее нагружении и разгрузке в режиме сверхупругости.

Рецензируемая диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Первая глава носит обзорный характер. Она содержит аналитический обзор различных феноменологических моделей поведения СПФ и соответствующих систем определяющих соотношений. Убедительно обоснован выбор в качестве основы рассмотрения в данной диссертации модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, поскольку эта модель, с одной стороны, правильно описывает основные термомеханические свойства и явления, характерные для СПФ, а с другой стороны, в рамках соответствующей системы определяющих соотношений удается получить решения краевых задач термомеханики для СПФ.

Вторая глава посвящена решению задач об изотермическом нагружении стержней и трубок из СПФ в режиме мартенситной неупругости. Такого типа процессы часто используются для задания начальной деформации рабочим телам силовозбудителей на этапе холостого хода. Рассмотрена простейшая статически определимая задача для тонкостенной трубки и более сложная статически неопределимая проблема для стержня сплошного круглого поперечного сечения. Ранее последняя задача была решена без учета упругих деформаций. Установлено, что учет упругих деформаций в данной задаче существенно меняет решение.

В главе 3 диссертации рассматривается альтернативный способ задания рабочим телам силовозбудителей из СПФ начальной деформации на этапе холостого хода, основанный на явлении накопления деформаций прямого термоупругого мартенситного превращения. Преимущество данного способа перед рассмотренным в разделе 2 состоит в том, что он годится для актуаторов многократного действия. Опять рассматривается статически определимая задача для тонкостенной трубки, и более сложные проблемы для толстостенных трубок и сплошных стержней. Эти последние задачи в связанной постановке аналитических решений не имеют. Получение таких решений осложняются тем обстоятельством, что весь объем материала делится на три зоны (упругую, зону, где

происходит фазовый переход, зону, где фазовый переход уже завершен). Границы между зонами заранее не известны, перемещаются в процессе фазового перехода, и определяются в процессе решения задачи. Предложен численный алгоритм пошагового решения таких задач. Достоверность полученного решения подтверждена наличием предельного перехода от решения связной задачи при стремлении параметра, определяющего связность к нулю к аналитическому решению несвязной задачи. Получен ряд важных выводов о перераспределении напряжений по сечению в процессе фазового перехода.

Четвертая глава диссертации посвящена моделированию рабочего хода торсионных актуаторов, происходящего в процессе обратного термоупругого фазового превращения благодаря явлению памяти формы. Рассмотрены случаи обратного превращения под действием постоянного крутящего момента, значение которого совпадает или отличается от того момента, который был приложен на этапе холостого хода. Исследован наиболее важный с прикладной точки зрения случай взаимодействия рабочего тела из СПФ с упругим контртелом, т.е. моделируется конструктивный двухпутевой эффект памяти формы, который используется обычно в силовозбудителях многократного действия. Соответствующие задачи решены в связной постановке. Получен целый ряд важных и интересных качественных выводов. В частности, установлено наличие существенного перераспределения напряжений по сечению элемента, коренным образом меняющее соответствующие эпюры, и не учитываемое при рассмотрении проблемы в несвязной постановке. Необходимо отметить, что в данной работе, в отличие от большинства известных аналогов, учитывается возможное структурное превращение при обратном переходе. За счет структурного перехода пики в эпюрах напряжений по сечению размываются.

В пятой главе работы получено решение задачи о поведении тонкостенной трубке из СПФ при ее нагружении и разгрузке в режиме сверхупругости. Проблема рассмотрена в дважды связной постановке, когда учитываются не только влияние действующих напряжений и деформаций на фазовые переходы, но и обратное влияние фазовых переходов на температурный режим. В отличие от известных аналогов учитываются не только процессы выделения и поглощения латентного тепла фазовых переходов, но и диссипативные явления. Проблема рассмотрена с учетом теплообмена трубки с окружающей средой, т.е. в постановке, приближенной к реальным условиям эксплуатации.

Замечания по тексту диссертации.

1. Во введении к диссертации почему-то много внимания уделено явлению обратимой памяти формы аустенитного и мартенситного типа. Это вызывает удивление, поскольку в самом тексте диссертации собственно явление обратимой памяти формы не рассматривается.

2. Основное содержание диссертации сводится к разработке методов и получению решений задач термомеханики СПФ при кручении. В таких условиях первая (обзорная) глава работы должна была бы содержать обзор работ по решению задач кручения для элементов из СПФ. В данной диссертации обзорная глава содержит лишь данные по системам определяющих соотношений для СПФ, краевые задачи в ней вообще не упоминаются. Обзорные данные по краевым задачам почему-то помещены во введение к диссертации. Следовало бы перенести обзорные части по краевым задачам в первую обзорную главу работы.

3. В разделе 2 установлено, что ошибка в случае пренебрежения упругим деформациями при решении задачи о кручении в режиме мартенситной неупругости растет с ростом величины напряжений. Однако, качественное объяснение этого результата отсутствует.

4. Довольно странно звучит вывод №7 третьей главы диссертации: "Показано, что с уменьшением толщины трубки из СПФ уменьшается накаливаемая неупругая деформация на момент окончания ПМП в совокупности с повышением температуры его окончания". Казалось бы, при уменьшении толщины трубки при прочих равных условиях растут напряжения и деформация также должна возрастать!

5. В работе решен ряд задач о поведении тонкостенных трубок из СПФ, претерпевающих прямые или обратные фазовые превращения под действием крутящих моментов. При этом может произойти потеря устойчивости соответствующей оболочки. Однако о такой возможности в тексте диссертации даже не упоминается.

Заключение.

Резюмируя сказанное выше, можно утверждать, что рассматриваемая диссертация является законченной научной работой, посвященной актуальной научно - технической проблеме, содержащей элементы научной новизны. Полученные результаты имеют важное прикладное значение, их достоверность сомнений не вызывает. Сформулированные замечания не изменяют общего положительного отношения к работе. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. В публикациях автора работы достаточно подробно изложено ее содержание. Таким образом, рецензируемая диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным Положением «О порядке присуждения учёных степеней», а ее автор, Саганов Е.Б. заслуживает присуждения ему

ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация Саганова Е.Б. обсуждена и одобрена на Научно - техническом совете ОАО НИАТ 09.11.2016г., протокол № 9

Заместитель Генерального директора

по науке ОАО НИАТ

д.т.н., профессор



Егоров В.Н.

Контактные данные организации: Открытое Акционерное Общество
"Национальный Институт Авиационных Технологий" (ОАО НИАТ):

117587, Россия, Москва, Кировоградская ул., д. 3

Телефон: +7 (495) 312-30-27

факс: +7 (495) 312-30-27

E-mail: info@niat.ru

Официальный сайт: [http:// niat.ru](http://niat.ru)