

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
Генерального директора
ОАО «ЦНИИСМ»,
Д.т.н., профессор

Кульков А. А.



« » _____ 2015 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

НУШТАЕВА Дмитрия Владимировича

**«Численное моделирование процессов деформирования
сплавов с памятью формы»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности 01.02.04 –

«Механика деформируемого твердого тела»

Общие сведения о диссертационной работе.

На рассмотрение ведущей организации представлена диссертационная работа Нуштаева Дмитрия Владимировича общим объемом 176 листов машинописного текста, из которых 163 листа основного текста и 16 страниц приложений, включающая 111 рисунков и 13 таблиц, структурно подразделенная на введение, четыре главы, заключение, библиографический список из 171 наименования, два приложения, а также автореферат вышеозначенной диссертации.

Изучение диссертационной работы, автореферата и публикаций соискателя позволило сформулировать представленные ниже заключения.

1. Актуальность темы диссертационной работы

Активное применение функциональных материалов, в том числе материалов с эффектом памяти формы, включая металлические сплавы на базе

системы «никель-титан», наблюдается в различных отраслях техники, включая ракетно-космическую. При этом первоначальная концепция использования материалов с памятью в качестве актуаторов, силовозбудителей и элементов с большим диапазоном обратимых деформаций, по-видимому, далеко не исчерпывает всего спектра их возможностей и в статическом, и в динамическом режиме деформирования. Открытые в последнее время новые свойства сплавов с памятью позволяют предполагать, что в ближайшие 5-15 лет будут разрабатываться и новые приложения. В то же время, наряду с положительными особенностями поведения сплавов с памятью, обеспечивающими их эффективное приложение в технике, обнаруживаются и свойства, затрудняющие применение сплавов с памятью в ряде технических устройств, в первую очередь, склонность к потере устойчивости тонкостенными элементами при аномально низких критических значениях действующих нагрузок.

Проектирование перспективных изделий требует правильного учета как положительных, так и отрицательных особенностей термомеханического поведения сплавов с эффектом памяти формы. В современных условиях разработка конструктивных элементов сложной формы без применения численных методов детального расчета теплового и напряженно-деформированного состояний представляется неэффективной. Как правило, в инженерных расчетах используются стандартизованные комплексы прикладных программ на базе метода конечных элементов, обеспечивающие численное решение связанных задач механики, термодинамики, электродинамики и т. д. с применением моделей сплошных сред, предлагаемых разработчиком комплекса. Такие системы, как, например, ANSYS или ABAQUS обладают чрезвычайно широкой номенклатурой моделей, однако ни один из современных пакетов прикладных программ не включает модель термомеханического поведения сплавов с памятью, описывающей хотя бы основные процессы их деформирования. Как правило, имеется в наличии только модель сверхупругого деформирования сплава с памятью, а остальные процессы либо вообще не могут быть описаны, либо решение простейших модельных задач приводит к качественно неправильным результатам. Следовательно, разработка математических моделей термомеханического поведения сплавов с памятью формы и их включение в состав конечно-элементных комплексов является весьма важной для практики задачей.

Существующее семейство феноменологических моделей сплавов с эффектом памяти формы, предложенных А. А. Мовчаном с сотрудниками,

позволяет описать большинство известных на сегодняшний день эффектов, но ее практическое применение на текущий момент резко ограничено модельными задачами за счет отсутствия программных реализаций, совместимых со стандартными конечно-элементными комплексами. Ряд систем, например MSC/Marc или Simulia ABAQUS, допускают расширение пользовательскими моделями материалов, однако реализация такого сложного термомеханического поведения, каким отличаются сплавы с памятью формы, является нетривиальной и достаточно трудоемкой задачей.

Таким образом, тема диссертационной работы является, несомненно, актуальной и важной. Актуальность темы частично подтверждается и тем фактом, что работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и гранта конкурса «У.М.Н.И.К».

2. Оценка содержания диссертационной работы, ее завершенность.

Основными целями диссертационной работы являлись:

- формулировка связной модели термомеханического поведения сплава с эффектом памяти в форме, совместимой с требованиями программного комплекса конечно-элементного моделирования Simulia ABAQUS;
- программно-алгоритмическая реализация предложенной модели, совместимая с модулем UMAT комплекса ABAQUS;
- верификация работоспособности предложенной модели в составе комплекса ABAQUS.

Практическими целями диссертации являлись:

- исследование устойчивости прямолинейной формы равновесного состояния стержня из равноатомного никелида титана, претерпевающего прямое мартенситное превращение;
- решение ряда практических задач для пространственных тонкостенных систем из сплава с памятью формы, претерпевающего фазовые превращения.

Для достижения сформулированной цели диссертационной работы соискателем были поставлены и решены следующие **задачи**:

- на основе известной односвязной модели А. А. Мовчана, описывающей термомеханическое поведение сплава с памятью формы при различных режимах деформирования, получены соотношения для компонентов матрицы податливости материала, зависящих от температуры, напряжений и параметра фазового состава; обращение выведенной матрицы податливости приводит к искомой матрице жесткости (касательным модулям материала),

- используемой при построении локальной матрицы жесткости элемента и глобальной матрицы жесткости конструкции с помощью стандартных процедур метода конечного элемента;
- с использованием полученных выражений для компонентов матрицы податливости материала с эффектом памяти формы построен алгоритм вычисления матрицы жесткости на каждом шаге вычислительного процесса, обеспечивающего решение нелинейной краевой задачи механики деформируемого твердого тела, совместимого со стандартом UMAT конечно-элементного комплекса ABAQUS, разработана и встроена в состав конечно-элементного комплекса пользовательская подпрограмма на языке Fortran, реализующая составленный алгоритм вычисления матрицы жесткости;
 - сформулирована система тестовых задач, решение которых необходимо для обоснования работоспособности предложенной программной реализации модели термомеханического поведения материала с эффектом памяти формы, построена простейшая конечно-элементная модель для численного решения данных задач средствами комплекса ABAQUS, оснащенного пользовательским программным модулем, получены численные решения тестовых задач и показано соответствие численных результатов известным экспериментальным зависимостям для равноатомного никелида титана;
 - поставлены и решены в нелинейной трехмерной постановке задачи о докритическом одноосном статическом сжатии, потере устойчивости прямолинейной формы равновесного состояния и закритическом состоянии призматических стержней из сплава с эффектом памяти при равномерном охлаждении через интервал температур прямого мартенситного превращения и показано, что потеря устойчивости наступает в процессе прямого перехода, качественно и количественно подтверждены ранее полученные в одномерной линеаризованной постановке выводы о решающем влиянии фазового перехода на потерю устойчивости стержнями;
 - на основе разработанного алгоритма и программного модуля, реализующего односвязную модель термомеханического поведения никелида титана, построены решения ряда задач о деформировании структурированных ячеистых оболочек из никелида титана в режиме сверхупругости на примере кардиологического стента, результаты сопоставлены с экспериментальными данными, полученными автором лично.

Описание постановки и решения описанных задач, анализ результатов сведены в работу следующей **структуры и содержания**.

Во **введении** кратко обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели работы, поставлены задачи, решаемые для достижения целей работы, обоснован выбор объекта и метода исследования, обоснована научная новизна полученных результатов работы, их теоретическая и практическая значимость, представлены сведения о внедрении результатов исследования, личном вкладе соискателя, апробации работы, публикациях автора, структуре и объеме диссертации, а также перечислены результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** на базе описания основных известных на сегодняшний день особенностей термомеханического поведения материалов с эффектом памяти формы, обзора и анализа основных моделей сплавов с памятью и известных программных реализаций существующих моделей показано, что существующие комплексы прикладных программ на базе метода конечных элементов не обеспечивают решения многих задач о деформировании сплавов с эффектом памяти формы, а наиболее развитые модели сплавов с памятью имеют преимущественно теоретическую ценность из-за отсутствия алгоритмической и программной реализации, совместимой с инженерными комплексами конечно-элементного моделирования. На базе полученных выводов выбрана модель термомеханического поведения сплава с эффектом памяти формы и поставлена общая задача ее адаптации к применению в составе комплекса Simulia / ABAQUS, частные задачи разработки алгоритма и программного модуля, его тестирования, а также предложены задачи, решение которых имеет теоретическое и прикладное значение и допускает практическую проверку работоспособности модели и программного модуля.

Во **второй главе** кратко описаны основные положения односвязной модели А. А. Мовчана термомеханического поведения сплава с эффектом памяти, изложена процедура построения матрицы податливости, зависящей от температуры, напряжений и параметра фазового состава. Приведен алгоритм вычисления касательных модулей материала на шаге вычислительного процесса при пошаговом численном решении нелинейной задачи механики деформируемого твердого тела. Сформулированы тестовые задачи для типичных режимов деформирования сплава с памятью, а именно: изотермическое нагружение – разгрузка в режиме одноосного растяжения призматического тела, реализующая состояние сверхупругости; изотермическое нагружение растяжением призматического тела с последующей разгрузкой при сохранении остаточной фазовой деформации и ее снятие при нагреве тела выше температуры окончания обратного фазового превращения;

нагружение призматического тела в аустенитном фазовом состоянии одноосным растяжением с последующим охлаждением вплоть до полного прямого мартенситного превращения с генерацией фазовой деформации и нагревом вплоть до полного обратного мартенситного превращения со снятием фазовой деформации; проведено сравнение численных результатов с известными экспериментальными зависимостями и сделан вывод о работоспособности алгоритма и программного модуля.

В третьей главе поставлена задача исследования докритического одноосного сжатия, потери устойчивости прямолинейной формы равновесного состояния и закритического деформирования призматических стержней из сплава с эффектом памяти формы. Проведены предварительные расчеты для полностью аустенитного и полностью мартенситного состояний материала в линеаризованной одномерной постановке задачи. Проведен выбор типа, формы и амплитуды начального несовершенства (погиби стержня), положенного в основу исследования потери устойчивости в трехмерной нелинейной постановке задачи. Описана постановка трехмерной краевой задачи для стержня, соответствующая шарнирному опиранию торцов в одномерной модели. Предложен критерий поиска точки бифуркации на базе оценки кинетической энергии стержня, переходящего из прямолинейной в изогнутую форму равновесного состояния. Описано численное решение задачи сжатия стержня постоянной продольной силой при равномерном охлаждении через интервал температур прямого мартенситного превращения, приведены основные результаты для шарнирно опертого и защемленного стержней при различных длинах. Показано распространение фазового превращения по длине и сечению стержня при фазовом переходе в процессе выпучивания. Показано, что потеря устойчивости стержнем происходит в процессе фазового превращения при значениях критических сил, существенно меньших эйлеровой оценки по минимальному значению модуля в мартенситном состоянии, тем самым на базе нелинейной трехмерной подтверждены ранее полученные в одномерной линеаризованной постановке результаты исследования.

В четвертой главе приведены решения практических задач, полученные численно средствами конечно-элементного комплекса Simulia/ABAQUS, оснащенного предложенным автором программным модулем, реализующим односвязную модель термомеханического поведения сплава с эффектом памяти формы. Рассмотрено деформирование цилиндрической оболочки ячеистой структуры из никелида титана при фазовых превращениях. Соискателем рассмотрен пример малоразмерной оболочки кардиологического стента,

деформирующегося в процессе раскрытия из транспортного в рабочее положение с образованием локальных зон фазовых превращений, и показана практическая работоспособность предложенного модуля. Рассмотрено решение задачи об осевом сжатии ячеистой оболочки с местной, а впоследствии и общей потерей устойчивости исходной формы равновесного состояния при кинематическом осевом сжатии и сверхупругом превращении в материале. Исследовано влияние контактного взаимодействия ячеек оболочки при деформировании на критическую силу и предельную несущую способность, для чего проведен вспомогательный физический эксперимент.

В заключении сформулированы основные выводы, приведены рекомендации по использованию результатов работы в инженерной практике.

В первом **приложении** к диссертации приводится текст программного модуля на языке Fortran, реализующего односвязную модель термомеханического поведения сплава с памятью и совместимого со стандартом UMAT конечно-элементного комплекса Simulia \ ABAQUS.

Во втором **приложении** к диссертации приводятся сведения о внедрении результатов работы.

3. Степень достоверности результатов и выводов.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается:

- апробированностью модели А. А. Мовчана термомеханического поведения сплавов с эффектом памяти
- обоснованным использованием математического аппарата и построением вычислительного алгоритма и программного модуля в соответствии с требованиями конечно-элементного комплекса Simulia/ABAQUS;
- аккуратностью формулировки модельных задач для проверки работоспособности модели и программного модуля, как теоретической, так и в конечно-элементной форме;
- сопоставлением получаемых соискателем результатов решения модельных задач с известными результатами экспериментов;
- сравнительным анализом полученных результатов с известными и обоснованными аналитическими решениями других авторов;
- обстоятельным использованием автором системы вспомогательных задач, решаемых для обоснования формулировки основных задач исследования;
- применением вспомогательных экспериментов для оценки влияния отдельных эффектов.

Обоснованность положений и выводов диссертационной работы подтверждается в том числе опубликованием ее результатов в отечественных и зарубежных рецензируемых периодических изданиях. Основные положения диссертации опубликованы в 9 работах, в том числе 4 – в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Автором получено свидетельство РОСПАТЕНТа о регистрации программного модуля. Кроме того, диссертация прошла апробацию на российских и международных конференциях и тематических семинарах, а часть исследований выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и гранта программы «У.М.Н.И.К».

4. Научная новизна основных результатов диссертации.

По результатам рассмотрения содержания диссертации по главам представляется необходимым выделить следующие новые, оригинальные, достоверные, полученные лично автором научные результаты, выносимые им на защиту:

- адаптацию модели А. А. Мовчана термомеханического поведения сплава с памятью формы для конечно-элементного решения практических инженерных задач механики конструкций сложной формы и ее реализацию в виде программного модуля системы Simulia\ABAQUS;
- решение задачи об устойчивости прямолинейной формы равновесия призматического стержня из сплава с памятью, претерпевающего прямое мартенситное превращение при сжатии под действием однородного температурного поля, в геометрически нелинейной трехмерной постановке;
- подтверждение предположения о решающем влиянии процесса фазового превращения на переход стержня в искривленную форму равновесия и вычисление распределения параметра мартенситной фазы по длине и сечению стержня в процессе фазового перехода;
- решение практической задачи о деформировании ячеистой цилиндрической оболочки типа кардиостента при радиальном сжатии и в процессе раскрытия, а также решение задачи о потере устойчивости и предельной несущей способности ячеистой цилиндрической оболочки при осевом сжатии на базе односвязной модели термомеханического поведения сплава с памятью формы.

5. Научная и практическая значимость результатов диссертации.

Поисковые и особенно прикладные исследования материалов с эффектом памяти, выработка инженерных решений применительно к различным областям техники на современном этапе не представляется возможной без использования численных методов решения задач механики деформируемого твердого тела, в первую очередь метода конечных элементов и стандартизованных комплексов прикладных программ на его базе. В то же время известно, что подавляющее большинство сертифицированных программных продуктов не обеспечивает описания многих представляющих интерес процессов деформирования сплавов с памятью, а известные модели, способные описать вновь обнаруживаемые эффекты, не реализованы в составе конечно-элементных комплексов и, следовательно, не могут быть эффективно применены на практике. Данный факт тормозит внедрение сплавов с памятью, поэтому результаты данной работы имеют несомненное практическое значение для тех отраслей, где такие материалы планируются к применению, в том числе и для аэрокосмической.

Следует отметить, что свойства сплавов с памятью и математические модели, способные описать хотя бы основные эффекты, очень сложны, вследствие чего приведение моделей к виду, пригодному для алгоритмизации, построение вычислительного алгоритма, совместимого с требованиями вычислительных комплексов, создание, отладка и тестирование программного модуля само по себе является весьма нетривиальной задачей, неотделимой от исследования собственно механического поведения материала – как теоретического, так и экспериментального. Кроме того, возможность решения существенно нелинейных задач с учетом различных усложняющих постановку факторов для случаев сложного напряженного состояния является ценной не только для практикующего инженера, но и для получения новых фундаментальных результатов, в том числе, в особенности, для планирования и осуществления физических экспериментов. Соответственно, полученный автором результат является ценным для механики деформируемого твердого тела и с фундаментальной точки зрения.

Помимо перечисленных, весьма значимыми являются также результаты решения задач об устойчивости стержней в процессе прямого фазового перехода, полученные в точной постановке задачи, теоретически описывающие потерю устойчивости прямолинейной формы равновесия вследствие развития области фазового перехода, являющегося дополнительным возмущением. Данные результаты крайне важны и для практики, так как их учет делает возможным грамотное проектирование элементов с памятью, работающих на

сжатие, т. е. в условиях, которые для данного класса материалов оказываются особо опасными.

6. Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Автором обеспечена возможность расчета сложных элементов конструкций из сплавов с эффектом памяти в процессе фазовых превращений в нелинейной постановке задачи стандартным комплексом конечно-элементного моделирования Simulia / ABAQUS. Соответственно, разработанный автором программный модуль может быть рекомендован к практическому применению пользователями данного программного комплекса для решения тех инженерных задач, где поведение материала адекватно описывается приведенными в диссертации определяющими уравнениями.

7. Оценка стиля диссертации и автореферата.

Диссертация изложена грамотно, логика и стиль изложения материала соответствуют требованиям к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, постановки задач сформулированы корректно, использование терминологии и математического аппарата не вызывает нареканий.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

8. Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие замечания, носящие характер рекомендаций, которые автор мог бы учесть в своей дальнейшей деятельности.

1. В силу того, что использование пространственных конечных элементов для моделирования реальных конструкций заведомо требует больших вычислительных ресурсов, представляла бы интерес реализация рассматриваемой в работе модели термомеханического поведения материала в рамках более экономичной теории балки с неоднородной структурой сечения.

2. Целесообразно было бы оценить степень влияния на термомеханическое поведение материала тепла, выделяющегося за счёт гистерезисных явлений при деформировании.

Приведенные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки работы.

С учетом перечисленного выше следует заключить, что *диссертационная работа представляет собой завершенное исследование, выполненное на высоком научном и методическом уровне.*

9. Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Представленная к защите диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой достигнута возможность применения односвязной феноменологической модели термомеханического поведения сплавов с эффектом памяти формы к численному решению задач о фазово-структурных превращениях при сложном неоднородном напряженно-деформированном и тепловом состоянии тел сложной формы при возможности учета прочих механических эффектов (локальных нагрузок, контактного взаимодействия и т.п.), а также подтверждена гипотеза о решающем влиянии на неустойчивость прямолинейной формы равновесного состояния тонкостенных элементов конструкций из сплавов с памятью фазовых переходов.

Полученные автором результаты базируются на апробированном теоретическом фундаменте, обоснованы достаточным количеством грамотно поставленных и решенных модельных задач, решения которых коррелируют с экспериментальными данными и известными аналитическими решениями.

Структура диссертации, язык изложения материала и терминология соответствуют современному уровню и существующим требованиям к научно-квалификационным работам.

Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, являются новыми и обладают практической и теоретической значимостью, опубликованы в достаточном количестве в профильных периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, неоднократно обсуждены на международных и российских научных конференциях, симпозиумах и семинарах высокого уровня с участием специалистов в области исследования. Часть результатов внедрена на практике, о чем имеются соответствующие подтверждающие документы.

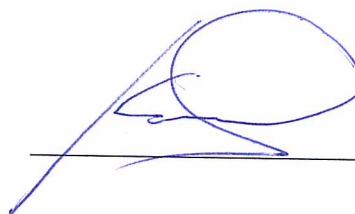
Область исследования и основные результаты диссертационной работы полностью соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

В целом, работу следует оценить положительно.

Диссертация отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Нуштаев Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании секции №3 НТС ОАО «ЦНИИСМ». Протокол заседания секции №5-2015 от 5 ноября 2015 г.

Начальник отделения
«Центр прочности»,
кандидат технических наук



Каледин В. О.

Ведущий научный сотрудник,
кандидат технических наук



Федоров В. В.

141371, Россия, Московская обл., г. Хотьково, ул. Заводская, ОАО «ЦНИИСМ»
Телефон: +7 (495) 993-00-11
Факс: +7 (49654) 3-82-94
E-mail: tsniism@tsniism.ru