

ОТЗЫВ

официального оппонента к. т. н. Афанасьева Александра Владимировича
на диссертацию Нуштаева Дмитрия Владимировича
«Численное моделирование процессов деформирования сплавов с памятью формы»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

1. Актуальность темы исследования, положенного в основу диссертационной работы.

Применение на всех этапах разработки конструкций самого различного назначения стандартных комплексов программ, обеспечивающих численное решение связанных задач механики деформируемого твердого тела, термодинамики, теплопередачи и т. д. оправдывает себя за счет существенного сокращения сроков разработки изделий и повышения их надежности благодаря возможности исследования напряженно-деформированного состояния в трехмерной нелинейной постановке без каких-либо упрощающих допущений. Следует заметить, однако, что совершенствование моделей, заложенных в комплексы прикладных программ, особенно моделей новых материалов отстает от потребностей инженерной практики, причем в ряде случаев очень существенно. Так, например, интенсивное применение сплавов с эффектом памяти формы началось в середине 1980-х годов и к настоящему моменту охватывает многие наукоемкие отрасли. Сплавы с памятью используются при создании адаптивных элементов конструкций, силовозбудителей, активных слоев композитных материалов и т. п. В то же время обзор существующих программных модулей, встроенных в абсолютное большинство конечно-элементных комплексов, приводит к выводу о невозможности их прямого применения в подавляющем большинстве случаев, кроме простейших задач. Как правило, из всего спектра уникальных особенностей термомеханического поведения сплавов с памятью программно реализовано только их сверхупругое поведение; попытки решения задач о прямых и обратных фазовых переходах приводят к существенным количественным, а иногда и к качественным ошибкам. А, так как элементы с памятью в основном имеют сложную геометрию и работают при больших деформациях, т. е. аналитические методы применять не удастся, отсутствие аппарата численного решения задач, совместимого со стандартным инженерным программным обеспечением, очень существенно затрудняет опытно-конструкторские работы.

Автором предпринята попытка адаптации к использованию в составе комплексов прикладных программ на базе метода конечных элементов математической модели сплава с памятью формы, предложенной А. А. Мовчаном и обеспечивающей достоверное, коррелирующее с экспериментальными данными решение многих задач при комбинированном механическом и тепловом нагружении. Данное направление работ, очевидно, является более чем актуальным.

2. Научная новизна основных результатов диссертации.

Судя как по весьма обстоятельному обзору литературы, приведенному автором в диссертации, так и по обзорным публикациям в зарубежных ведущих журналах, и по работам, посвященным численному решению задач о механическом поведении сплавов с памятью формы, создание универсальной модели материала, полностью приспособленной и готовой к инженерному в рамках метода конечных элементов и притом полностью апробированной, на сегодняшний день пока не существует. Отработано в основном численное решение задач о сверхупругом деформировании сплавов на базе гистерезисных моделей. Следовательно, основной результат диссертационной работы – адаптация апробированной и хорошо себя зарекомендовавшей модели к программной реализации,

полностью совместимой со стандартными алгоритмами коммерческих комплексов прикладных программ, является новым.

С другой стороны, сведения об исследовании устойчивости сплавов с памятью формы вообще практически отсутствуют в русской и иностранной научной литературе, исключая работы А. А. Мовчана с сотрудниками, где опубликованы экспериментальные данные и некоторые численные решения в линеаризованной (бифуркационной) постановке задачи. Закритическое деформирование элементов из сплавов с памятью формы, судя по всему, никем не изучалось, в том числе и по причине отсутствия надлежащего аппарата численного решения задач. Таким образом, полученные автором результаты решения задач об устойчивости стержней и структурированных цилиндрических оболочек в полностью нелинейной постановке являются новыми и диссертательными.

3. Степень обоснованности и достоверности результатов работы.

Автором в основу работы положена модель А. А. Мовчана, развиваемая в течение последних 20 лет и в достаточной мере апробированная на основе многочисленных экспериментов, так что теоретические основы диссертации представляются вполне достоверными. Математический аппарат, применяемый при преобразовании определяющих соотношений к виду, совместимому с вычислительными алгоритмами комплекса прикладных программ Simulia ABAQUS, использован аккуратно. Построенный алгоритм и программный комплекс на его основе проверены на базе правильно выбранной системы модельных задач, для которых решение хорошо известно; поскольку полученные численные решения коррелируют с их решениями, соответствие результатов моделируемым физическим процессам представляется вполне обоснованной. Решения задач об устойчивости структурированных оболочек сосудистых стентов получены при обстоятельной оценке основных факторов, влияющих на деформирование системы; так, влияние сил трения при контакте ячеек оболочки исследовано на решении вспомогательной задачи, сопоставленном с экспериментальными данными, полученными автором лично. Таким образом, все основные результаты диссертационной работы представляются в полной мере достоверными и достаточно обоснованными.

4. Практическая значимость результатов работы.

Основным важным результатом, практическая важность которого для инженеров не вызывает никаких сомнений, является обеспеченная автором возможность применения апробированной модели материала, описывающей поведение материалов с памятью формы при тепловом и механическом нагружении в нелинейной связной постановке, к численному моделированию деформирования сложных элементов конструкций, встречающихся на практике и не поддающихся расчету аналитическими методами. Наличие такой возможности позволит проектировать новые адаптивные системы самого разного назначения.

Вторым важным результатом, имеющим как фундаментальное, так и прикладное значение, является описание потери устойчивости и закритического деформирования тонкостенными элементами с памятью. Решения таких задач немногочисленны, при том, что поведение тонкостенных элементов из сплавов с памятью аномально. Такие элементы конструкций, как следует из известных данных, склонны к ранней потере устойчивости при протекании фазовых переходов. Данная особенность существенно ограничивает применение сплавов с памятью в составе ответственных элементов конструкций, пока она подробно не изучена. Полученные автором данные, во-первых, являются подтверждением ранее предложенных гипотез о решающем влиянии на устойчивость систем с памятью самих по себе процессов фазовых превращений, играющих роль возмущения. Во-вторых, вычисленные критические силы коррелируют с известными аналитическими решениями, следовательно, последние могут применяться на практике.

5. Структура и содержание диссертации.

Диссертация объемом 176 листов машинописного текста, в том числе 163 листа основного текста и 16 листов приложений, состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка их 171 наименования, двух приложений и содержит 111 рисунков и 13 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, составляющих основу диссертации, указана новизна полученных автором результатов и их практическая значимость, достоверность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о публикации материалов работы, их апробации и внедрении в инженерную практику.

В первой главе диссертации описаны основные свойства сплавов с эффектом памяти формы, приведен достаточно подробный анализ современного состояния проблемы описания их термомеханического поведения на базе различных концепций, в первую очередь – с использованием моделей, основанных на введении внутренних степеней свободы. Сделан обоснованный выбор феноменологической модели А. А. Мовчана. Перечислены некоторые нерешенные задачи механики материалов с памятью, в том числе проблемы описания потери устойчивости тонкостенных элементов при сжатии в процессе фазового перехода. На основе аналитического обзора литературы сформулированы цели работы, описана постановка задач, решение которых необходимо для достижения целей исследования, и обоснована научная новизна результатов.

Во второй главе приведены основные соотношения модели А. А. Мовчана термомеханического поведения сплава с памятью в однократно связанной формулировке. Определяющие уравнения записаны в инкрементальной форме, и на их базе выведены явные выражения компонентов матрицы касательной податливости материала. Результатом численного обращения данной матрицы является касательная матрица жесткости, т. е. матрица, содержащая информацию о касательных модулях нелинейно и неупруго деформируемого материала. Матрица касательной жесткости является основным объектом, распознаваемым модулем определяющих уравнений комплекса прикладных программ на базе метода конечных элементов, таким образом, достигается совместимость модели с вычислительной процедурой метода конечных элементов. Вычисление компонентов данной матрицы осуществляется по исходным данным на шаге приращения нагрузки при решении нелинейной задачи по входным данным, следующим из конечно-элементной модели. Приведена блок-схема алгоритма, в соответствии с которым построен программный модуль. Описаны основные модельные задачи, решение которых необходимо для апробации алгоритма: силовой, тепловой и смешанный механизмы фазового перехода. Тестовые вычисления реализованы на простейшей модели призматического тела, составленного двумя конечными элементами, что позволяет свести к минимуму влияние на результат накопления вычислительной погрешности.

В третьей главе выполнена постановка задачи об устойчивости прямолинейной формы равновесия сжатого продольной силой призматического стержня, охлаждаемого равномерно через интервал температур прямого мартенситного превращения. В предположении об известности направления выпучивания задача решается в двумерной постановке, т. е. стержень моделируется с разбиением конечными элементами по длине и поперечной координате, что дает возможность отказаться от гипотез элементарной теории и получить информацию о динамике фазового перехода в процессе выпучивания. В качестве начального возмущения выбрана погибь стержня, величина которой оценивается по решению вспомогательных задач при сопоставлении результатов в нелинейной и линеаризованной (бифуркационной) постановках. Получены также реперные оценки критических сил для стержня на базе классической стержневой конечно-элементной модели путем численного решения спектральной задачи. Описана постановка краевого условия, соответствующего шарнирному опиранию торцов стержня (стойка Эйлера) в

одномерном варианте, на базе введения фиктивных условий контакта без трения со вспомогательными поверхностями на торцах стержня.

Приводятся численные решения серии задач о продольном сжатии стержня постоянной центральной силой, не вызывающей сверхупругого фазового перехода, при наличии некоторой заранее выбранной величины начальной погиби, и при равномерном охлаждении, при этом в качестве критерия смены формы равновесного состояния выбрана точка интенсивного роста кинетической энергии стержня, соответствующего движению при переходе из прямолинейной в изогнутую форму. Критическая сила отыскивается перебором значений сжимающей силы от начального значения с малым отрицательным шагом как максимальная величина, при которой начальная погибь интенсивно возрастает, т. е. реализуется определение Ляпунова устойчивости механической системы по отношению к малому возмущению начального состояния. Показано, что для всех рассмотренных длин стержней (относительно малых) критическая сила не превышает 11-13% эйлеровой оценки по минимальному значению модуля упругости, при этом в начале процесса выпучивания фазовый состав неоднороден и распределен по сечению стержня примерно по линейному закону. Таким образом, подтверждается упоминаемое автором в первой главе предположение о решающем влиянии фазового перехода, приводящего к неоднородности стержня, на его устойчивость. Аналогичные оценки получены и для стержня, заземленного по торцам.

В четвертой главе работы практическая значимость разработанного варианта модели, алгоритма и программы его численной реализации иллюстрируется решением ряда прикладных задач. Исследуется деформированное состояние сосудистых стентов из никелида титана при установке их в рабочее положение в поврежденном участке сосуда, при этом реализуется сверхупругий механизм фазового перехода. Автором построена - трехмерная конечно-элементная модель системы «стент-транспортный контейнер-сосуд» и осуществлено полноценное моделирование раскрытия стента и его взаимодействия со стенкой сосуда при удалении контейнера. Показано, что при рассматриваемом варианте геометрических параметров стента он обеспечивает равномерное давление на стенки сосуда, что является основной рабочей характеристикой данного типа инструментов. Подробно анализируется напряженное состояние в структуре и показано, что фазовое превращение проходит практически только в вершинах ячеек структуры стента.

Рассмотрена задача об осевом сжатии стента с местной потерей устойчивости, затем глобальной потерей устойчивости прямолинейной формы и вплоть до исчерпания его несущей способности. Получено численное решение данной задачи в нелинейной постановке, причем для двух вариантов стента – кобальт-хромового сплава, деформируемого в состоянии пластичности, и нитинолового, находящегося в состоянии сверхупругости, и приводится сравнение двух режимов. Для первого стента реализован физический эксперимент на осевое сжатие, и конечно-элементные модели построены в полном соответствии с условиями осуществленного физического эксперимента. На базе экспериментальной зависимости «продольное удлинение - продольная сила», снятой при кинематическом нагружении, анализируется влияние трения в контактирующих ячейках стента на потюю устойчивости и предельную несущую способность стента. Показано, что при учете трения диаграмма деформирования, построенная на базе численного эксперимента, хорошо соответствует реальной диаграмме. Аналогичные результаты получены и для нитинолового стента. Исследовано напряженное состояние стента и показано, что фазовые превращения концентрируются в вершинах ячеек оболочки стента.

В заклучении кратко описаны основные результаты работы и сформулированы выводы, а также предложения по применению результатов на практике.

В приложении № 1 приведен текст программного модуля, реализующего модель термомеханического поведения сплава с эффектом памяти формы.

В приложении № 2 содержится свидетельство о внедрении данного программного модуля в инженерную практику.

Отмеченные недостатки работы.

1. Во введении замечены пропуски ссылок на отдельные оригинальные работы, которым соответствуют приведенные экспериментальные задачи; имеются опечатки.
2. При решении задачи об устойчивости стержней во второй главе не приводится обстоятельное сравнение полученных в трехмерной нелинейной постановке критических значений сжимающих сил с соответствующими величинами, полученными ранее аналитически в одномерной линеаризованной постановке, несмотря на то, что такие решения перечислены автором в обзорной части работы.
3. В четвертой главе рассмотрены прикладные задачи, реализующие только механизм сверхупругого фазового превращения, который, как следует из обзорной главы, является наиболее изученным и реализованным в ряде программных комплексов. Для полного отражения практических возможностей разработанной модели следовало привести также примеры практических задач с реализацией температурного механизма фазового превращения.
4. Экспериментальные данные, приведенные в четвертой главе, получены только для стента из кобальт-хромового сплава, не обладающего эффектом памяти; для никелида титана с эффектом памяти формы экспериментальные данные, которые были бы наиболее ценны, в работе не приводятся.
5. Автором описана задача о потере устойчивости стентом при сжатии, как имеющая прикладное значение для обеспечения работоспособности стента, однако рассмотрено только сжатие стента в транспортном состоянии, когда механизм нагружения сжатием не ясен; в то же время задача о сжатии развернутого стента силами трения со стороны сосуда, которая, видимо, более интересна с практической точки зрения, не решается.


Заключение.

Диссертация Нуштаева Д. В. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвященную разработке актуальной темы, содержащую полученные лично автором вполне достоверные новые научные результаты, имеющие несомненное прикладное значение, выполнена на высоком уровне, структурирована и оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Область исследования и результаты диссертации полностью соответствуют паспорту специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела».

Таким образом, представленная к защите диссертационная работа полностью 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».

Официальный оппонент
инженер ООО «Нанотехнологический
центр композитов»
кандидат технических наук


Афанасьев Александр Владимирович

Адрес: г. Москва, Волгоградский
проспект, 42, корп.5
Подпись Афанасьева А. В. заверяю.

Зам. Ген. директора




Стоянова Яна Олеговна