

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет: Д 212.125.05

Соискатель: Нуштаев Дмитрий Владимирович

Тема диссертации: Численное моделирование процессов деформирования сплавов с памятью формы

Специальность: 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:

На заседании 25 декабря 2015 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно – квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и принял решение присудить Нуштаеву Дмитрию Владимировичу ученую степень кандидата технических наук.

Присутствовали: *председатель диссертационного совета* Тарлаковский Д.В., *заместитель председателя диссертационного совета* Фирсанов В.В., *ученый секретарь диссертационного совета* Федотенков Г.В.

Члены диссертационного совета: Антуфьев Б.А., Бирюков В.И., Гришанина Т.В., Дмитриев В.Г., Дудченко А.А., Крахин О.И., Кузнецов Е.Б., Медведский А.Л., Мовчан А.А., Нерубайло Б.В., Сибиряков А.В., Сидоренко А.С., Солдатенков И.А., Туркин И.К., Тютюнников Н.П., Шклярчук Ф.Н.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.05 к.ф.-м.н., доцент

Федотенков Г.В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.05
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)», МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета № 27 от «25» декабря 2015 г.

О присуждении Нуштаеву Дмитрию Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Численное моделирование процессов деформирования сплавов с памятью формы» по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите «21» октября 2015 г., протокол № 26 диссертационным советом Д 212.125.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, приказ о создании диссертационного совета Д 212.125.05 – № 105/нк от «11» апреля 2012 г.

Соискатель Нуштаев Дмитрий Владимирович, 1988 года рождения, в 2011 году окончил с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Соискатель ученой степени кандидата наук освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в очной аспирантуре ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». В настоящее время соискатель является аспирантом ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ.

Диссертация выполнена на кафедре «Механика наноструктурных материалов и систем» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент **Жаворонок Сергей Игоревич**, старший научный сотрудник отдела механики адаптивных и композиционных материалов и систем ФГБУН «Институт прикладной механики Российской академии наук» (ИПРИМ РАН).

Официальные оппоненты:

Зезин Юрий Павлович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», г. Москва;

Афанасьев Александр Владимирович, кандидат технических наук, инженер ООО «Нанотехнологический центр композитов», г. Москва

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - **Федеральный научно-производственный центр ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (ОАО «ЦНИИСМ»)**, Россия, Московская обл., г. Хотьково в своем положительном заключении, подписанном первым заместителем генерального директора и главного конструктора, доктором технических наук, профессором Кульковым А. А. и начальником отдела прочности кандидатом технических наук Калединым В. О., утвержденном

генеральным директором, главным конструктором ФНПЦ ОАО «ЦНИИСМ» Барыниным В. А., указала, что в целом диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи 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.). Она соответствует положению ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Нуштаев Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04. - Механика деформируемого твердого тела.

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе 9 работ по теме диссертации, из которых 4 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Содержание опубликованных работ полностью отражает основные результаты диссертации. В опубликованных работах диссертанта описаны: адаптация апробированной модели термомеханического поведения сплава с памятью формы (СПФ) для численного решения инженерных задач механики конструкций, решение задачи об устойчивости статического равновесия призматического стержня из СПФ, претерпевающего прямое мартенситное превращение под действием однородного температурного поля и постоянной сжимающей силы, в геометрически нелинейной трехмерной постановке задачи, решение практической задачи о деформировании ячеистой цилиндрической оболочки при радиальном обжатии и расширении вследствие устранения наложенной внешней геометрической связи, решение задачи о потере устойчивости прямолинейной формы и о предельной несущей способности ячеистой цилиндрической оболочки при осевом

сжатию. Основные результаты диссертационной работы доложены на ведущих российских научных конференциях и симпозиумах с международным участием.

Наиболее значимые работы:

1. Computer-aided design of the human aortic root / E. A. Ovcharenko, K. Y. Klyshnikov, A. R. Vlad, I. N. Sizova, A. N. Kokov, D. V. Nushtaev, A. E. Yuzhalin, and I. U. Zhuravleva // *Computers in Biology and Medicine*. – 2014, Vol. 54. – pp.109-115 (статья в рецензируемом журнале).
2. Выбор оптимальных геометрических параметров ячейки опорного каркаса транскатетерного клапана / Е. А. Овчаренко, К. Ю. Клышников, Г. В. Саврасов, Д. В. Нуштаев, Т. В. Глушкова // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2014, № 6. – С. 943-956 (статья в рецензируемом журнале).
3. Клышников М. Ю., Овчаренко Е. А., Нуштаев Д. В. Способы оптимизации геометрии ячейки каркаса самораскрывающегося протеза клапана аорты // *Технология живых систем*. – 2014, № 3. – С. 39-45 (статья в рецензируемом журнале).
4. Численно-экспериментальное исследование деформирования и устойчивости цилиндрической оболочки ячеистой структуры при осевом сжатии / Д. В. Нуштаев, С. И. Жаворонок, К. Ю. Клышников, Е. А. Овчаренко // *Труды Московского авиационного института*. – 2015, Т. 82 (статья рецензируемом журнале).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

- от ведущей организации **Федеральный научно-производственный центр ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (ОАО «ЦНИИСМ»)**, Россия, Московская обл., г. Хотьково, подписан первым заместителем генерального директора и главного конструктора, доктором технических наук, профессором Кульковым А. А. и начальником отдела прочности

- кандидатом технических наук Калединым В. О., утвержден генеральным директором, главный конструктором ФНПЦ ОАО «ЦНИИСМ» Барыниным В. А., отзыв положительный;
- от официального оппонента, **Зезина Юрия Павловича**, доктора технических наук, ведущего научного сотрудника ФГБОУ «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва, заверенный директором НИИ механики МГУ Окуневым Юрием Михайловичем; отзыв положительный;
 - от официального оппонента, **Афанасьева Александра Владимировича**, кандидата технических наук, инженера ООО «Нанотехнологический центр композитов», г. Москва, заверенный заместителем генерального директора Стояновой Яной Олеговной; отзыв положительный;
 - от доцента ФГБОУ ВО Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, доцента, кандидата физико-математических наук, **Земскова Андрея Владимировича**, отзыв положительный;
 - от старшего научного сотрудника ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»), кандидата технических наук, **Ситникова Николая Николаевича**, отзыв положительный;
 - от руководителя группы конструкции планера проектно-конструкторского отдела конструкторского бюро филиала ООО «Авиакомпания Волга – Днепр», кандидата технических наук, **Загордана Анатолия Александровича**, отзыв положительный;
 - от заведующего кафедрой «Информатика и прикладная математика» ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» члена корреспондента РААСН, доктора технических наук, **Акимова Павла Алексеевича**, отзыв положительный;

– от начальника отдела 5551 ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», кандидата технических наук **Владимирова С. А.**, отзыв положительный;

В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационного исследования, дан краткий обзор работы по главам, отмечены актуальность, новизна, достоверность полученных автором результатов и их практическая значимость.

В поступивших отзывах имеются замечания.

В отзыве ведущей организации **ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (ОАО «ЦНИИСМ»)** имеются следующие замечания:

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.

Замечания в отзыве официального оппонента **Зезина Юрия Павловича**:

1. На стр. 19 диссертации при описании кривой растяжения СПФ текущие значения напряжений сопоставляются с некоторым характерным значением σ_m . Величина σ_m не указана на представленном графике и не описана в тексте.
2. Полученные в главе 2 расчетные зависимости и диаграммы не сопоставлены с известными экспериментальными данными.

3. В принятой модели термомеханического поведения СПФ для описания упругих свойств материала используются значения модуля сдвига и объемного модуля для аустенитного и мартенситного состояний сплава. В таблицах, представляющих принятые для расчетов значения параметров модели, указаны модули Юнга и одно значение коэффициента Пуассона. Если коэффициент Пуассона не зависит от состояния материала, то представляется естественным использовать его в определяющих соотношениях модели термоупругого поведения.
4. На стр. 65 отмечено, что для аппроксимации геометрической модели стержня использован балочный конечный элемент В32. Следовало бы привести более подробное описание принятого конечного элемента.
5. Для ряда задач значения критической силы потери устойчивости стержней сопоставляются с расчетными значениями, полученными с использованием формулы Эйлера. При этом применимость формулы Эйлера для конкретного расчетного случая в работе не проверяется.
6. На стр. 21 - 23 рис. 1.6 – 1.9 представлены без ссылок на оригинальные работы.
7. В тексте диссертации имеются опечатки.

Замечания в отзыве официального оппонента **Афанасьева Александра Владимировича**:

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 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 стенки, 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.

В отзыве **Земскова Андрея Владимировича** имеются следующие замечания:

1. В постановке задачи многие обозначения не разъяснены, а именно ΔS , σ_{ij} (вероятно, компоненты тензора напряжений), $Z(\sigma_{ij})$, θ в формуле (3); $\varepsilon_{ij}^{(2)}$ (вероятно, компоненты тензора фазовых деформаций) в формуле (4); σ_i - в формуле (7). Непонятен также смысл штрихов и крышек у величин, имеющих одинаковое начертание: σ_{ij} и σ'_{ij} в формуле (3), $\varepsilon_{ij}^{(2)}$ и $\varepsilon_{ij}^{(2)'}$ в формулах (4) и (7), ω_{ij} и $\hat{\omega}_{ij}$ в формулах (7) -

(9) и (10), (11). Кроме того, формулы (7) имеют некорректную запись с точки зрения тензорной алгебры.

2. В программной реализации алгоритма не пояснено как вычисляются компоненты касательной матрицы жесткости C_{ijkl} .
3. На рисунке 4а на одной координатной плоскости представлены функции, зависящие от разных аргументов $P(\tau)$ и $T(t)$. Кроме того, все графики полученных зависимостей имеют очень мелкие подписи, затрудняющие их восприятие.

В отзыве **Ситникова Николая Николаевича** имеются следующие замечания:

1. В задачах о потере устойчивости стержней процесс охлаждения описывается однородным полем температур без решения соответствующей задачи теплопроводности. Представляет интерес оценка влияния на результаты расчета неравномерного поля температур, полученного на базе решения нестационарной задачи теплопроводности с условиями естественной конвекции.

2. В тексте автореферата имеются опечатки.

В отзыве **Загордана Анатолия Александровича** имеются следующие замечания:

1. Неясен способ реализации условий шарнирного закрепления торцов стержня, представленного в виде трехмерного тела.
2. Не указана величина начальной погиби стержня и также отсутствует оценка её влияния на величину критической силы потери устойчивости.
3. Автореферат содержит опечатки.

В отзыве **Акимова Павла Алексеевича** имеется одно замечание: целый ряд представленных в автореферате рисунков малоинформативен, отсутствует необходимая сопроводительная информация (см., например, рис. 3, 4, 5 и т.д.).

В отзыве **Владимирова С. А.** замечания отсутствуют.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами в области исследования, что подтверждается прилагаемым списком основных публикаций оппонентов в ведущих рецензируемых изданиях. Ведущая организация проводит исследования в области проектирования и производства конструкций из современных полимерных композитных материалов для ракетно-космической техники, транспортного, энергетического, нефтехимического машиностроения.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый вариант численной формулировки модели термомеханического поведения СПФ, адаптированный для решения практических инженерных задач механики конструкций из СПФ;

предложены модификации подхода к численному решению задач о нелинейном деформировании сплавов с эффектом памяти формы на базе связанной модели термомеханического поведения СПФ и неявных схем решения дифференциальных уравнений;

доказана перспективность и эффективность использования разработанного варианта модели и алгоритма на его основе для численного решения нелинейных задач термомеханики деформируемых твердых тел с эффектом памяти формы методом конечных элементов;

введены новые трактовки понятия о механизме потери устойчивости тонкостенных сжатых элементов с эффектом памяти формы, претерпевающих мартенситные фазовые превращения под действием температурного поля.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана справедливость ранее сформулированных гипотез о причинах потери устойчивости тривиальных форм равновесного состояния сжатых стержней из сплавов с памятью формы в процессе фазового перехода при охлаждении через диапазон температур прямого мартенситного превращения;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использован комплекс численных методов решения существенно нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, в том числе формулировка метода конечных элементов в приращениях перемещений, алгоритм вычисления локальной матрицы жесткости нелинейно деформируемого неупругого материала;

изложены основы теории термоупругих фазовых превращений в материалах с эффектом памяти формы;

раскрыты существенные преимущества используемой в работе модели термомеханического поведения сплавов с эффектом памяти перед ранее известными аналогами, в том числе зарубежными;

изучено влияние динамики фазового превращения на устойчивость стержней с памятью формы, влияние сил трения на предельную несущую способность ячеистых оболочек с памятью формы, влияние параметров ячеистой оболочки с памятью формы на ее интегральные механические характеристики;

проведена модернизация программных комплексов применительно к исследованию деформированного состояния адаптивных элементов конструкций с памятью формы при комплексных силовых и тепловых воздействиях.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в инженерную практику численные методы, алгоритмы и программные модули, позволяющий проводить решение практических задач для элементов из СПФ, претерпевающих фазовые превращения;

определены пределы и перспективы практического использования результатов в изучении распространения фазово-структурных превращений при комбинированном тепловом и силовом внешнем воздействии на тела с эффектом памяти формы;

создана численная формулировка математической модели, позволяющая эффективно решать стандартным методом конечных элементов новые задачи термомеханики сплавов с эффектом памяти формы с использованием сертифицированных программных комплексов;

представлены рекомендации и предложения по проектированию различных элементов из сплавов с памятью формы, работающих в режиме фазово-структурных переходов, с наиболее полным учетом особенностей их термомеханического поведения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория, положенная в основу диссертационного исследования, построена на базе апробированной общей теории термомеханического поведения сплавов с памятью формы, с использованием математически строгих и физически корректных закономерностей;

идея базируется на обобщении опыта математического моделирования деформирования твердых тел с фазово-структурными переходами, а также численного решения существенно нелинейных задач механики;

использованы сравнение авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике экспериментальными методами;

установлено качественное и количественное соответствие авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках;

использованы современные методики сбора и анализа исходной информации.

Личный вклад соискателя состоит в адаптации связной модели термомеханического поведения сплавов с памятью формы к численному решению практических задач для тел сложной формы при комплексном механическом и тепловом внешнем воздействии, обосновании достоверности результатов, получаемых на базе разработанного алгоритма, построении нового решения задачи об устойчивости стержней из сплавов с памятью формы в нелинейной постановке и обосновании на его основе ранее предложенных концепций оценки устойчивости тонкостенных сжатых элементов из СПФ, а также в решении ряда задач о деформировании оболочек ячеистой конфигурации из СПФ.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов технических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 19, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного
совета Д 212.125.05 д.т.н., профессор

Тарлаковский Д.В.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.05 к.ф.-м.н., доцент

Федотенков Г.В.

Ученый секретарь МАИ (НИУ)

к.т.н., доцент

«25» декабря 2015 г.



Ульяшина А.Н.