



**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук  
(ИМАШ РАН)**

101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский пер., дом 4  
телефон: (495) 624-98-00, факс: (495) 624-98-63, e-mail: [info@imash.ru](mailto:info@imash.ru), [www.imash.ru](http://www.imash.ru)

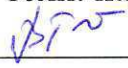
ОКПО 00224588, ОГРН 1037700067492, ИНН 7701018175, КПП 770101001

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИМАШ РАН

д-р техн. наук

 В.А. Глазунов



В диссертационный совет Д 501.001.91 при  
Московском государственном университете  
имени М.В. Ломоносова  
119991, Москва, Ленинские горы, Главное  
здание МГУ, механико-математический  
факультет.

**Отзыв ведущей организации**

на диссертацию Машихина Антона Евгеньевича на тему  
«Краевые задачи термомеханики для цилиндра и сферы из сплавов с  
памятью формы», представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 01.02.04 –механика  
деформируемого твердого тела.

На отзыв представлены: текст диссертационной работы на 142 стр., включая  
78 рисунков, библиографический список из 110 наименований, автореферат  
на 26 стр., включая список из 15 публикаций по теме диссертации (6 статей в  
рецензируемых журналах перечня ВАК РФ). Диссертация состоит из  
введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы.

**Актуальность избранной темы.**

**Тема диссертации актуальна.** Большинство публикаций,  
посвященных исследованию сплавов с термомеханической памятью,

посвящены описанию экспериментальных исследований и формулировке моделей поведения этих материалов. Значительно меньше работ связаны с решением краевых задач термомеханики для элементов конструкций из этих материалов. Из-за этого обстоятельства сдерживается широкое промышленное внедрение сплавов с термомеханической памятью. Диссертация Машихина Антона Евгеньевича посвящена разработке методов решения таких задач, что является актуальной проблемой.

Во многих коммерческих комплексах, предназначенных для решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела анонсируется возможность решения краевых задач для сплавов с термомеханической памятью. Однако ощущается недостаток решений тестовых краевых задач для неоднородных напряженных состояний, сопоставление с которыми позволило бы убедиться в достоверности получаемых при использовании этих комплексов результатов. В данной диссертации получен ряд аналитических решений связанных краевых задач для сферы и цилиндра, которые можно использовать в качестве тестовых для проверки достоверности результатов, получаемых с помощью коммерческих комплексов прикладных программ для изделий, содержащих сплавы с термомеханической памятью. Тема диссертации, направленной на решение описанных выше проблем, является **актуальной**.

**Цель диссертационной работы** А.Е. Машихина состоит в разработке аналитических, численно – аналитических и численных методов решения связанных краевых задач о напряженно – деформированном, температурном и фазово – структурном состоянии толстостенных цилиндра и сферы из сплава с термомеханической памятью, а также задач о предельном деформировании указанных элементов.

### **Краткий анализ содержания.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, рисунков, таблиц и двух приложений.

**Введение** содержит общую характеристику диссертации, определяет ее цели, задачи и методы их решения, научную новизну и прикладные аспекты, кратко обосновывает тезис о достоверности полученных результатов.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней приведена краткая история исследований сплавов с термомеханической памятью, описаны два основных эффекта, характерных для этих материалов и важных для проблем, решаемых в данной диссертации (накопление деформаций прямого превращения и монотонной памяти формы). Основная часть обзорной главы связана с описанием перспективных применений сплавов с термомеханической памятью в различных областях промышленности. Рассмотрены различные аспекты использования соединительных муфт из СПФ, что непосредственно связано с тематикой диссертации, актуаторы и силовозбудители с рабочими телами из сплавов с термомеханической памятью, применение этих материалов для демпфирования колебаний, в том числе в сейсмостойком строительстве, различные медицинские применения.

Часть обзорной главы посвящена описанию системы определяющих соотношений модели нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях. Сформулировано положение об активных процессах пропорционального нагружения, и, что особенно важно для данной работы, частные случаи этого положения, для справедливости которых выполнение условия равенства функций распределения микронапряжений в аустенитном и мартенситном состоянии материала не требуется. В той же главе формулируются различные постановки краевых задач термомеханики для сплавов с термомеханической памятью. Последний параграф обзорной главы посвящен работам, в которых решались краевые задачи термомеханики для толстостенных цилиндров и сфер из сплавов с термомеханической памятью. Сделан вывод о том, что таких решений не много, причем практически все они получены численными методами. В рамках модели нелинейного деформирования сплавов с термомеханической памятью нет даже численных решений задач для

толстостенных сферы и цилиндре. Тем самым четко определено место данной диссертации среди известных работ, посвященных той же тематике.

**Вторая глава** посвящена решению задачи о толстостенном цилиндре из сплава с термомеханической памятью в предположении о равномерном распределении по материалу значения объемной доли мартенситной фазы. Задачи решаются полуобратным методом. Априори предполагается выполнение условий справедливости положения об активных процессах пропорционального нагружения, которое и применяется для получения аналитического решения. Далее выполнение упомянутых выше условий проверяется по готовому решению.

Рассмотрены постановки задачи при наличии осевой силы, (в том числе при нулевом значении осевой силы) а также в условиях плоской деформации. Рассмотрены случаи учета несжимаемых упругих деформаций и пренебрежения упругими деформациями (жестко-фазово-структурный анализ). Разрешающая система состоит из трех (при учете продольной силы) и двух (случай плоской деформации) алгебраических уравнений. Установлено, что в случае пренебрежения упругими деформациями условия справедливости положения об активных процессах пропорционального нагружения выполнены и, таким образом, получено точное аналитическое решение поставленной задачи. При учете упругих деформаций условия справедливости положения об активных процессах пропорционального нагружения нарушены. Следовательно, полученное для этого случая решение соответствует не исходной системе определяющих соотношений в приращениях, а системе алгебраических определяющих соотношений, получающейся с помощью положения об активных процессах пропорционального нагружения. Численное решение задачи с учетом упругих деформаций в рамках исходной системы определяющих соотношений в приращениях получено далее (см. описание главы 4 диссертации).

В той же главе рассмотрен вопрос о предельных нагрузках для рассматриваемых элементов из сплавов с термомеханической памятью.

Рассмотрены два типа предельных нагрузок. Первый связан с началом пластического деформирования по дислокационному механизму, что приводит к ухудшению функциональных свойств сплавов с термомеханической памятью. Превышение действующими нагрузками предельных значений второго типа не приводит к росту генерируемых при этом фазово–структурных деформаций. Для предельных нагрузок обоих типов получены аналитические выражения. Этот результат имеет важное прикладное значение, поскольку может использоваться при проектировании соответствующих изделий.

Раздел 2.6 второй главы посвящен решению задачи об обратном превращении при нагреве толстостенной цилиндрической оболочки из сплава с термомеханической памятью при ее контакте с упругой трубой. Эта задача фактически моделирует процесс создания термомеханического соединения трубопроводов с помощью муфты из сплава с термомеханической памятью. Здесь получен неожиданный результат, состоящий в том, что максимальные значения напряжений при обратном превращении получаются не в последней точке обратного превращения, а примерно за 10% до завершения этого фазового перехода. Тем самым подтверждается необходимость решения задачи об обратном превращении с учетом фазово–структурных деформаций и невозможность ограничиться упругим решением задачи о полном снятии ранее полученных фазово–структурных деформаций.

**Третья глава** посвящена решению задач о прямом фазовом превращении для толстостенной сферы из сплава с термомеханической памятью, находящейся под действием постоянного внешнего и внутреннего давления. Данная задача сведена к решению двух алгебраических уравнений. В целом результаты решения для сферы качественно соответствуют аналогичным данным, полученным во второй главе для толстостенного цилиндра.

**Четвертая глава** посвящена решению тех же задач, но в другой постановке, когда предполагается равномерное распределение по материалу

не параметра фазового состава, а температуры. Данная постановка моделирует медленные процессы охлаждения материала, когда температура успевает выровняться по всему сечению изделия. Рассмотрение в данной постановке осложнено тем обстоятельством, что область решения задачи делится, в общем случае, на три части, в первой из которых фазовый переход уже завершился, второй еще происходит, а в третьей еще не начался. Границы между областями заранее не известны, перемещаются по материалу в процессе фазового перехода и определяются итерационным путем при решении задачи. В каждой из областей приходится рассматривать свои разрешающие уравнения. Решение производится численно по шагам изменения температуры. Сопоставлены решения, полученные в рамках предположения о равномерном распределении параметра фазового состава и равномерном распределении температуры. Установлено, что при стремлении к бесконечности скачка плотности энтропии при переходе от мартенситного состояния к аустенитному решение, соответствующее равномерному распределению температуры стремиться к решению, соответствующему равномерному распределению параметра фазового состава. Тем самым было получено решение задачи в предположении о равномерном распределении параметра фазового состава с учетом упругих деформаций, в рамках исходной системы определяющих соотношений в приращениях.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

**Достоверность и обоснованность** полученных научных результатов работы основаны на том, что часть полученных решений являются аналитическими и могут быть проверены непосредственно. Достоверность полученных численных решений проверялась для предельных случаев, когда численные решения должны были сходиться к аналитическим. Адекватность описания поведения изделий из материалов с термомеханической памятью определяется адекватностью описания самих свойств материала в рамках современной модели нелинейного деформирования сплавов с термомеханической памятью.

**Апробация** результатов диссертационной работы проведена на различных российских и международных научных конференциях, и семинарах. Результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, в том числе в 6 статьях из Перечня Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки федерации.

**Научная новизна** результатов диссертации заключается в том, что впервые получены аналитические решения задач о прямом превращении в толстостенных цилиндре и сфере из сплава с термомеханической памятью, находящихся под действием постоянного внешнего и внутреннего давления. Впервые поставлены и аналитически решены задачи о двух типах предельных нагрузок для элементов из СПФ. Качественные особенности решения задачи о прямом превращении в условиях пренебрежения упругой деформации и предположения о равномерности распределения параметра фазового состава по материалу (независимость напряжений от значения параметра фазового состава и пропорциональность деформаций и смещений значению этого параметра) аналитически получены впервые.

**Практическая ценность** работы определяется тем, что полученное в диссертации решение задачи о прямом превращении в толстостенном цилиндре из сплава с термомеханической памятью моделирует новый способ предварительной раздачи соединительной муфты термомеханического соединения, отличающийся от известного метода (дорнирования) тем, что предлагаемая процедура меньше повреждает внутреннюю поверхность муфты (ее рельеф). Решение задачи об обратном превращении в муфте совместно с упругим трубопроводом моделирует процедуру создания термомеханического соединения. Оно позволяет найти напряжения в муфте и трубопроводе и оценить прочность соединения. В тексте диссертации приведены результаты расчета для конкретно выпускаемой в промышленных масштабах соединительной муфты из сплава с эффектом памяти формы, используемой для соединения трубопроводов гидравлических систем целого ряда самолетов.

**Автореферат** правильно и полно отражает содержание диссертации.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Есть претензии по обзорной части работы (глава 1). В ней при изложении истории создания сплавов с памятью формы и исследования их поведения даже не упомянуто фундаментальное открытие Г.В. Курдюмовым и Л.Г. Хандросом термоупругих мартенситных фазовых превращений, которые и являются основой уникальных термомеханических свойств этих материалов.

2. Помимо нового способа предварительной раздачи муфты из сплава с термомеханической памятью, основанного на явлении накопления деформаций прямого превращения, следовало бы в диссертации рассмотреть для сравнения известный способ увеличения внутреннего диаметра муфты, основанный на явлении мартенситной неупругости.

3. В правой части формулы (2.68) для предельной нагрузки в рассматриваемом в диссертации случае  $s \rightarrow \infty$  стоит несобственный интеграл (подынтегральная функция стремится к  $\infty$  на нижнем пределе этого интеграла). Интеграл вычисляется, строятся соответствующие графики для предельной нагрузки, однако доказательство сходимости интеграла в тексте диссертации отсутствует.

4. В работе при построении алгоритма численного решения для случая равномерного распределения температуры по радиусу использовалась упрощенная система определяющих соотношений, в рамках которой учитывается эффект зарождения элементов новой фазы при прямом превращении, но не учитывается эффект развития этих элементов. Интересно было бы установить, как влияет это упрощение на результаты решения задачи.

5. Важный раздел диссертации, называемый «Практические расчеты» не фигурирует в оглавлении к тексту диссертации, хотя имеется в ее тексте.

Сформулированные замечания, относящиеся, в основном, не к сути работы, а к форме ее изложения, не меняют общей положительной оценки диссертации.

## Заключение

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Машихина Антона Евгеньевича «Краевые задачи термомеханики для цилиндра и сферы из сплавов с памятью формы» является законченной научно-квалификационной работой, имеющей фундаментальное и прикладное значение и соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор А.Е. Машихин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на заседании секции Ученого совета отдела "Виброакустика машин" института машиноведения РАН, протокол №1 от 12 апреля 2017 г.

Отзыв составили

Д.ф.-м.н, проф.

11.05.17

Березин А.В.

заведующий лабораторией ИМАШ РАН

Д.т.н., заведующий отделом

11.05.17

Косарев О.И.

"Виброакустика машин" ИМАШ РАН