

На правах рукописи



Шарунов Алексей Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АЭРО – КОСМИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

Специальность 1.1.8
«Механика деформируемого твердого тела»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2024 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор
Мовчан Андрей Александрович

Официальные оппоненты:

Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Нуштаев Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, ведущий эксперт АО «Северсталь Менеджмент», г. Москва.

Ведущая организация:

АО «Национальный Институт Авиационных Технологий», г. Москва.

Защита диссертации состоится «28» июня 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.508.01 в Институте прикладной механики Российской Академии наук по адресу: 125040, г. Москва, Ленинградский просп., д. 7, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПРИМ РАН и на сайте <https://iam.ras.ru/sharunovdiss/>.

Автореферат разослан «___» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.508.01

Корнев Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сплавы с памятью формы – металлические твердые растворы, относящиеся к категории функциональных «умных» материалов. При изменении температур и напряжений в пределах диапазона функционирования СПФ могут находиться в двух принципиально различных фазовых состояниях с различными физико – математическими характеристиками: в высокотемпературном трудно деформируемом аустенитном состоянии с объемно-центрированной кубической решеткой (B_2); в низкотемпературном легко деформируемом мартенситном фазовом состоянии, характеризующемся моноклинной кристаллической решеткой с искажениями (B_{19}'). Уникальные термомеханические свойства этих материалов связаны с происходящими в них бездиффузионными твердотельными фазовыми и структурными превращениями, вызванными изменениями температуры и/или напряженного состояния при тепловом, механическом, электромагнитном или комбинированном внешнем воздействии. Термоупругий переход из аустенитной в мартенситную фазу называется прямым мартенситным превращением (ПМП) и в пространственном случае может происходить в 12 различных кристаллографических направлениях. В случае, когда ПМП происходит только за счет охлаждения образца в ненапряженном состоянии, образуется хаотически ориентированный мартенсит, осредненная по представительному объему материала деформация формоизменения которого равна нулю. Если ПМП происходит при охлаждении образца при ненулевых внешних механических нагрузках, то происходит накопление фазовых деформаций, а материал образца обретает структуру частично или полностью ориентированного мартенсита. Изменение степени ориентированности мартенсита вследствие действия внешних механических напряжений, т.е. переход от хаотического мартенсита к ориентированному, называется структурным переходом. Для снятия накопленных неупругих деформаций ПМП необходимо нагреть образец из СПФ через интервал температур обратного мартенситного превращения (ОМП). В случае изотермического нагружения образца из СПФ в состоянии хаотического мартенсита происходит изменение степени ориентированности мартенсита и накопление структурных деформаций. Это явление называется мартенситной неупругостью (МН).

Одним из наиболее перспективных применений СПФ в современной авиационной и космической промышленности является изготовление из них соединительных муфт, предназначенных для герметичного разъемного термомеханического соединения (ТМС) трубопроводов, цилиндрических силовых элементов и т.д. В настоящее время данный тип соединения широко применяется в гидравлических системах ЛА таких зарубежных фирм как: Grumman Corporation, Airbus, Boeing. В рамках эксперимента «Софора», проводимого на международной космической станции «МИР», муфты из СПФ применялись для соединения элементов ферменной конструкции в открытом космосе. В отечественной авиации соединительные муфты из СПФ не нашли широкого применения на практике в виду наличия ряда проблем, из которых оказались критичными: отсутствие доступного математического аппарата для проведения проекторочных расчетов муфт с учетом уникальных свойств активных материалов и сложности технологического процесса предварительного деформирования (подготовки) муфт. Используемый в настоящий момент метод дорнирования может приводить к механическим повреждениям внутренней функциональной поверхности муфты, снижая ее надежность. Исходя из всего вышесказанного, разработка нового альтернативного способа предварительного деформирования муфт из СПФ является актуальной задачей.

Для внедрения и активного использования элементов конструкций содержащих СПФ, требуется наличие достоверных решений краевых задач механики этих сплавов. Вопросам моделирования термомеханического поведения простейших элементов

конструкций из СПФ (таких как стержень и пластина) посвящены работы Мовчана А.А., Волкова А.Е., Гаврюшина С.С., Мишустина И.В., Рогового А.А., Крахина О.И., Думанского С.А., Жаворонка С.И., Нуштаева Д.В., Сафронова П.А., Саганова Е.Б., Tanaka Y., Auricchio F., Lexcelent C., Lagoudas D.C., Show J.A.

Вопросам моделирования термомеханического поведения осесимметричных оболочек вращения из СПФ посвящены работы Лихачева В.А., Волкова А.С., Кухаревой А.С., Мовчана А.А., Жаворонка С.И., Курбатова А.С., Машихина А.Е., Шкутина Л.И., Tang Z., Jiang D., Amini M.R., Mirzaeifar R.A.

Учет всех уникальных свойств СПФ накладывает ряд ограничений на получение аналитического решения краевых задач механики. Для преодоления указанной проблемы в последнее время используются численные методы, и наибольшую популярность для оценки напряженно – деформируемого состояния (НДС) конструкций обрел метод конечных элементов (МКЭ). На данный момент в сертифицированные ПК конечно – элементного моделирования (КЭМ), такие как MSC Marc, COMSOL, Simulia Abaqus, Ansys, интегрированы 3 феноменологические модели поведения СПФ: Auricchio F, Lagoudas D.C, термомеханическая модель деформирования СПФ (MSC Marc). Отмеченные модели имеют ряд существенных недостатков и не позволяют качественно и количественно верно оценить НДС разрабатываемых конструкций из СПФ. Использованию МКЭ при решении краевых задач механики СПФ посвящены работы Fernandes R., Stebner A., Terriault P., Xu J., Saleeb A., Young S.-Y, Christ D., Lagoudas D.C., Zhou B., Но Н., Нуштаева Д.В., Саганова Е.Б. При этом в большинстве из них используются встроенные в ПК модели поведения материалов. В работе Нуштаева Д.В. рассмотрена процедура интеграции определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ в ПК КЭМ Simulia Abaqus. Однако разработанный программный модуль не учитывает влияние параметра вида напряженного состояния на величину накапливаемых неупругих деформаций. Учитывая вышеизложенное, разработка и интеграция в комплексы КЭМ программных модулей, основанных на современных макромеханических математических моделях, описывающих большинство уникальных свойств СПФ, является актуальной задачей.

Цели и задачи работы

1. Разработка алгоритмов численного решения задач о деформировании СПФ в процессе ПМП и режиме МН на базе модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, распространенной на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния.
 2. Разработка программных модулей, реализующих данные алгоритмы, и их дальнейшая интеграция, процедурой создания пользовательской модели материала UMAT, в ПК КЭМ Simulia Abaqus.
 3. Верификация разработанных программных модулей на модельных задачах с однородным одно и двух – мерным напряженно – деформируемым состоянием имеющих аналитическое решение.
 4. Применение алгоритмов и разработанных на их основе программных модулей, интегрированных в ПК Simulia Abaqus к решению задач предварительного деформирования толстостенных сферы и цилиндра из СПФ в осесимметричной и трехмерной постановках.
- Разработка альтернативного способа предварительного деформирования муфты из СПФ и его сравнение с используемым в настоящее время методом дорнирования.

Научная новизна

В ходе выполнения поставленных задач в работе **впервые:**

1. Получено аналитическое выражение определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях для

связной постановки краевых задач, с учетом влияние изменения параметра вида напряженного состояния на приращение параметра фазового состава.

2. Феноменологическая модель нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, распространенная на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния, интегрирована процедурой создания пользовательского материала UMAT (в виде программных модулей) в ПК КЭМ Simulia Abaqus. Разработанные программные модули, верифицированные на модельных задачах с однородным напряженно – деформированным состоянием, адаптированы для получения численного решения краевых задач механики СПФ при нагружении в режиме МН и процессе ПМП.

3. С использованием разработанных программных модулей получены численные решения задач предварительного деформирования толстостенных сферы и цилиндра из СПФ активным изотермическим нагружением монотонно возрастающим внутренним давлением в режиме МН.

4. С использованием разработанных программных модулей получены численные решения задач предварительного деформирования толстостенных сферы и цилиндра из СПФ в однократно связной постановке за счет эффекта накопления фазовых и при выполнении определенных условий структурных деформаций ПМП под действием постоянного внутреннего давления.

5. На примере толстостенной сферы из СПФ получено численное подтверждение эффекта перераспределения напряжений в процессе ПМП связанного с движением по материалу фронта завершения фазового перехода и показано влияние учета структурного механизма деформирования СПФ на этот эффект.

6. Разработана математическая модель процесса предварительного деформирования муфтовых ТМС из СПФ с использованием эффекта накопления фазовых и при выполнении определенных условий структурных деформаций в процессе ПМП. Показаны достоинства и недостатки предлагаемого метода по сравнению с используемым в настоящее время методом дорнирования.

Теоретическая и практическая значимость работы

Получено аналитическое выражение определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях для связной постановки краевых задач, учитывающее влияние изменения параметра вида напряженного состояния на приращение параметра фазового состава.

На базе феноменологической модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, разработаны программные модули в ПК КЭМ Simulia Abaqus, позволяющие получать численные решения задач деформирования трехмерных конструкций из СПФ, претерпевающих фазовые и структурные превращения. В рамках первого программного модуля рассматривается процесс накопления структурных деформаций при изотермическом нагружении в режиме МН. В рамках второго модуля рассматривается процесс накопления фазовых, а при выполнении определенных условий, и структурных деформаций в процессе ПМП.

Решен ряд практических задач о деформировании толстостенной цилиндрической муфты из СПФ при нагружении как в режиме МН, так и в процессе ПМП на базе ПК КЭМ Simulia Abaqus и разработанных программных модулей.

В рамках диссертационного исследования показано влияние параметра вида напряженного состояния на НДС толстостенных конструкций из СПФ.

Получено численное подтверждение эффекта перераспределения напряжений в процессе ПМП в толстостенных конструкциях из СПФ, связанного с движением по материалу фронта завершения фазового перехода.

Приведенные в диссертации алгоритмы и результаты численного анализа НДС элементов конструкций, содержащих СПФ, являются практически значимыми при проектировании ТМС из СПФ.

Использование полученных результатов позволяет:

1. Рационально выбрать материал и геометрические параметры разрабатываемого муфтового ТМС из СПФ исходя из необходимости обеспечения требуемых величин прочности и жесткости, а также массово – габаритных характеристик получаемого изделия.
2. Определить рациональный способ предварительного деформирования муфтового ТМС из СПФ.
3. Определить необходимые параметры процесса для увеличения внутреннего радиуса муфты на необходимую величину.

Ряд исследований выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-01-00240). Внедрение части результатов диссертационной работы выполнено в виде рекомендаций и технических предложений по реализации варианта исполнения муфтовых соединений трубопроводов гидравлической и топливной систем летательного аппарата, а также методики оценки несущей способности элементов конструкций, содержащих сплавы с эффектом памяти формы и подтверждено актом ПАО «ОАК» - ОКБ «Сухого».

Методология и методы исследования

1. Модель нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, распространенная на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния.
2. Аналитические методы решения краевых термомеханических задач для элементов из СПФ, основанные на положении об активных процессах пропорционального нагружения (АППН).
3. Метод конечных элементов решения трехмерных и осесимметричных нелинейных задач механики деформируемого твердого тела.

Положения, выносимые на защиту

- Аналитическое обращение определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, полученное для связанной постановки краевых задач и учитывающее влияние изменения параметра вида напряженного состояния на приращение параметра фазового состава.
- Аналитические решения задач о предварительном деформировании тонкостенных цилиндрических оболочек вращения из СПФ в процессе ПМП и режиме МН, на базе феноменологической модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях распространенная на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния.
- Алгоритмы численного решения задач о деформировании элементов конструкций из СПФ в процессе ПМП и режиме МН на базе той же модели.
- Программные модули, реализующие данные алгоритмы и их интеграция в ПК КЭМ Simulia Abaqus посредством процедуры создания пользовательского материала UMAT.
- Верификация разработанных модулей на модельных задачах с одно и двух – мерным напряженно – деформируемым состоянием имеющих аналитическое решение.
- Результаты численного решения задач предварительного деформирования толстостенных сферы и цилиндра при активным изотермическим нагружением монотонно возрастающим внутренним давлением в режиме МН.

- Результаты численного решения задачи предварительного деформирования толстостенного цилиндра из СПФ при изотермическом нагружении абсолютно жестким телом большего диаметра (задача дорнирования).
- Результаты численного решения задачи предварительного деформирования толстостенного цилиндра из СПФ под действием постоянно давления в процессе ПМП.
- Результаты численного решения задачи предварительного деформирования толстостенных сферы и цилиндра постоянным внутренним давлением в процессе ПМП, с учетом протекания структурного перехода при выполнении условий $d\sigma_i > 0$, $\sigma_i(q_1) = \max_{q \in (0, q_1)} \sigma_i(q)$.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационного исследования, подтверждается следующими положениями:

1. Решение задач выполнено в рамках, феноменологической модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, распространенной на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния. Отмеченная модель учитывает наиболее актуальные явления и свойства, характерные для СПФ, проверена экспериментально и многократно апробирована при решении краевых задач механики СПФ. Значения материальных параметров и функций модели найдены путем экспериментальных исследований образцов из никелида титана.
2. Для разработки программных модулей использовался сертифицированный ПК КЭМ Simulia Abaqus с возможностью включения в его состав моделей термомеханического поведения неупругодеформируемых материалов, посредством процедуры создания пользовательской модели материала UMAT.
3. Верификация разработанных программных модулей проводилась на модельных задачах с однородным одно и двух – мерным НДС имеющих аналитическое решение.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на:

1. Международном молодежном научном форуме «Ломоносов» (г. Москва 2021, 2023 г.)
2. Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (г. Москва 2021, 2023 г.).
3. Всероссийской конференции посвященной 60 – летию полета Ю. А. Гагарина в космос (г. Миасс, Челябинская обл., 2021 г.)
4. II международной конференции «Математическое моделирование» (г. Москва 2021г.).
5. II международной молодежной конференции « Новые материалы XXI века, разработка, диагностика, использование» (г. Москва, 2022 г.)
6. Всероссийской научно – практической конференции «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов (г. Новосибирск, 2022 г.)
7. XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Г. Санкт – Петербург 2023 г.)
8. XIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (г. Москва, 2023).

Публикация результатов работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в т. ч. в 8 статьях в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи диссертационного исследования, излагается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору моделей поведения СПФ, феноменологии уникальных термомеханических свойств, возникающих в процессе деформирования тел, изготовленных из этого материала, а также современному состоянию проблемы использования муфтовых ТМС из СПФ в авиационной и космической промышленности.

В разделе 1.1 определены преимущества и проблематика использования соединений данного типа в современной авиационной и космической промышленности. Проведен литературный обзор современного состояния проблемы выбора сплава, используемого для создания муфтового ТМС.

Разделе 1.2 содержит краткое описание процессов фазовых и структурных превращений, протекающих в СПФ при их термомеханическом деформировании. Рассмотрены основные уникальные свойства СПФ, используемые при создании различных функциональных элементов конструкций из СПФ.

Раздел 1.3 посвящен литературному обзору микроструктурных и феноменологических математических моделей, позволяющих описать процесс термомеханического деформирования элементов конструкций из СПФ. Подробно рассмотрены три феноменологические модели (Auricchio F, Lagoudas D.C, термомеханическая модель деформирования СПФ), реализованные в сертифицированных ПК КЭМ Ansys, Abaqus, Comsol, MSC Marc. Определены достоинства и недостатки рассмотренных моделей. Установлено, что ни одна из моделей поведения СПФ реализованная в ПК КЭМ не позволяет качественно и количественно верно оценить НДС разрабатываемых элементов конструкций из СПФ. В результате проведенного анализа выработаны требования, предъявляемые к математической модели, для качественно и количественно верного описания НДС элементов конструкций в процессе их деформирования. Установлено, что отмеченным требованиям удовлетворяет нелинейная модель деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, распространенная на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния.

Раздел 1.4 посвящен описанию определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, распространенной на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния.

Вторая глава посвящена моделированию процесса деформирования тонкостенных осесимметричных конструкций, таких как сфера и цилиндр, из СПФ как при активном изотермическом нагружении в режиме МН, так и в процессе ПМП под действием постоянного давления. Рассматривались случаи нагружения как внутренним, так и внешним давлением. Решения задач получены в рамках выполнения условий положения об активных процессах пропорционального нагружения, в жестко фазово-структурной постановке, т.е. не учитывалось влияние упругих и температурных деформаций. Задача о деформировании тонкостенного цилиндра из СПФ рассматривается в двух постановках:

- Закрепление торцов муфты от осевых смещений (деформации в осевом направлении равны нулю) в дальнейшем модель 1 (плоская деформация). Касательные напряжения, как на торцах, так и на цилиндрических поверхностях равны нулю.
- Закрепление осевых перемещений по плоскости симметрии, перпендикулярной продольной оси оболочки (напряжения по торцам муфты, как касательные, так и в осевом направлении равны нулю) в дальнейшем модель 2.

Решения рассматриваемых задач получены в виде зависимостей радиальных смещений w от величины прикладываемого давления P (рис.1-2).

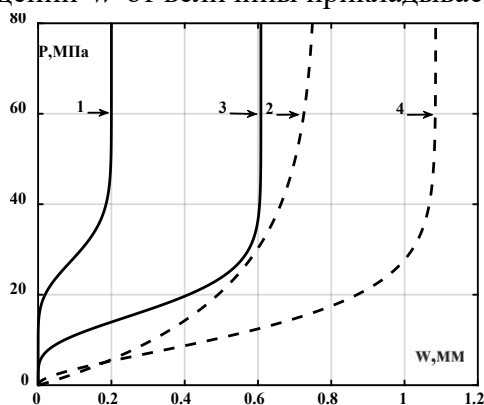


Рис.1 Зависимости $w-P$ для тонкостенной сферы из СПФ.

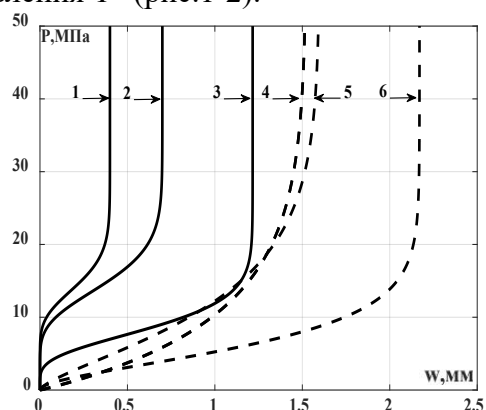


Рис.2 Зависимости $w-P$ для тонкостенного цилиндра из СПФ.

При решении задач были приняты следующие обозначения кривых: сплошная линия соответствует активному изотермическому нагружению монотонно возрастающим давлением в режиме МН, штриховые – нагружению постоянным давлением в процессе ПМП. На рис. 1 кривые 1,3 – построены для случаев нагружения внутренним давлением, 2,4 – внешним давлением. На рис.2 кривые 1,4 – соответствуют нагружению внешним давлением при решении задачи в рамках модели 2, кривые 3,6 – внутренним давлением при решении задачи в рамках модели 2, кривые 2,5 – построены для случаев нагружения внутренним и внешним давлением (совпадают) при решении задачи в рамках модели 1. На основании приведенных рисунков можно сделать вывод, что выгоднее деформировать тонкостенные осесимметричные конструкции при нагружении постоянным давлением в процессе ПМП, поскольку для деформирования изделия на заданную величину в этом случае необходимо прикладывать меньшее внешнее усилие. Следует отметить, что при деформировании тонкостенной сферы из СПФ как в режиме МН, так и в процессе ПМП величина радиальных смещений при действии внешнего давления больше, нежели чем при действии внутреннего. В то время, как при решении задачи о деформировании тонкостенного цилиндра из СПФ наблюдается обратная тенденция. Данный эффект объясняется тем, что при одинаковом нагружении тонкостенных сферы и цилиндра, параметр вида напряженного состояния имеет различные значения.

Третья глава посвящена численному моделированию задачи о деформировании толстостенной муфты из СПФ при активном изотермическом нагружении монотонно возрастающим давлением в режиме МН.

В разделе 3.1. изложен алгоритм численного решения задач о деформировании элементов конструкции из СПФ при нагружении в режиме МН, основанный на аналитическом обращении определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях. Приращения компонент тензора полных напряжений через приращение компонент деформаций при нагружении в режиме МН, записывается в виде:

$$d\sigma_{ij} = \frac{1}{3} K_M d\varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G_M d\varepsilon_{ij} - \psi \sigma_{ij}' \sigma_{kl}' d\varepsilon_{kl}' \quad (1)$$

$$\phi_2(\sigma_i, \mu_\sigma) = \frac{\partial F_2(\sigma_i, \mu_\sigma)}{\partial \sigma_i}, \quad \psi = \frac{9G_M^2 \rho_{d2}(\mu_\sigma)}{\sigma_i^2} \frac{\phi_2(\sigma_i, \mu_\sigma)}{1 + 3G_M \rho_{d2}(\mu_\sigma) \phi_2(\sigma_i, \mu_\sigma)}$$

Где $d\varepsilon_{ij}', d\varepsilon_{kk}$ - приращение девиатора и шаровой части тензора деформаций, σ_{ij}', σ_i - девиатор и интенсивность напряжений, K_M, G_M - утроенный объемный модуль и модуль сдвига для мартенситного фазового состояния, δ_{ij} - дельта Кронекера, $\rho_{d2}(\mu_\sigma)$ - параметр материала, коррелирующий с интенсивностью кристаллографической деформации, $F_2(\sigma_i, \mu_\sigma)$ - интегральная функция распределения интенсивности микронапряжений в мартенситном состоянии СПФ.

Соотношение (1) позволяют обычным путем получить матрицы жесткости конечных элементов, связывающие приращения узловых смещений и приращения узловых сил, а также касательную матрицу жесткости [C] системы конечных элементов (КЭ). Используя технологию создания пользовательского материала UMAT в рамках диссертационного исследования была разработана и интегрирована в ПК КЭМ Simulia Abaqus модель материала, позволяющая проводить численное моделирование деформирования элементов конструкции из СПФ в режиме МН. Алгоритм взаимодействия подпрограммы с ПК Simulia Abaqus представлен в виде блок – схемы на рис. 3. Критерием структурного превращения являются два условия: $d\sigma_i > 0, \sigma_i(q_1) = \max_{q \in (0, q_1)} \sigma_i(q)$. В случае, если одно из этих условий не выполняется процесс считается завершенным и работа программы останавливается.

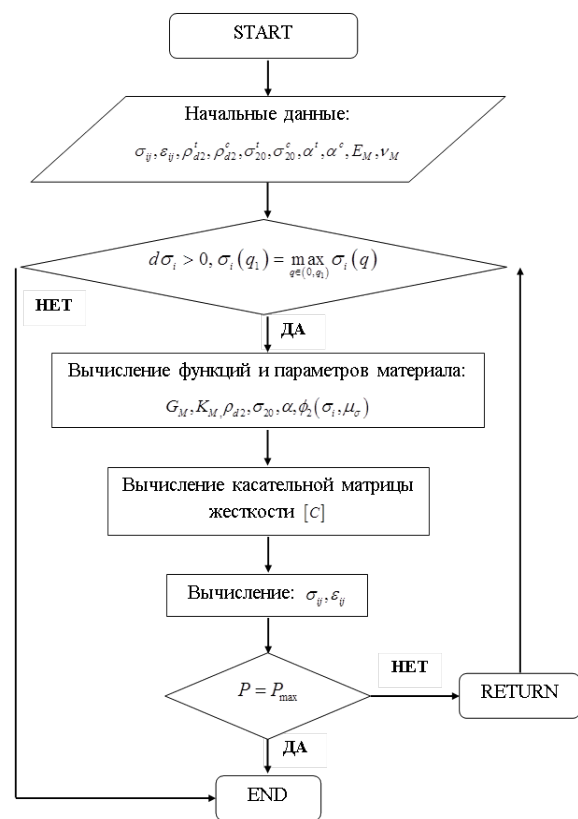


Рис. 3 Блок – схема программы

В разделе 3.2 показана процедура верификации разработанного программного модуля. В качестве верификационного базиса используется полуаналитическое решение трехмерной по пространству краевой задачи о НДС толстостенной сферической оболочки из СПФ, находящейся под действием внутреннего или внешнего давления с учетом зависимости неупругих деформаций от параметра вида напряженного состояния.

На рис. 4а,б показано влияние учета упругих деформаций (упругого модуля) на эпюры радиальных и окружных напряжений по сечению сферы для случая действия внутреннего давления $P = 50 \text{ МПа}$, $P = 200 \text{ МПа}$. Кривые 1,3 – соответствуют решению задачи с учетом упругих деформаций, кривые 2,4 – без учета упругих деформаций. Модуль Юнга варьируется от E , что соответствует модели 2, до $E \cdot 10^6$ что соответствует модели 1. Пунктирными линиями отмечены промежуточные значения модуля Юнга $E \cdot 10$, $E \cdot 10^3$, $E \cdot 10^5$. $\eta = r/b$ - безразмерная радиальная координата.

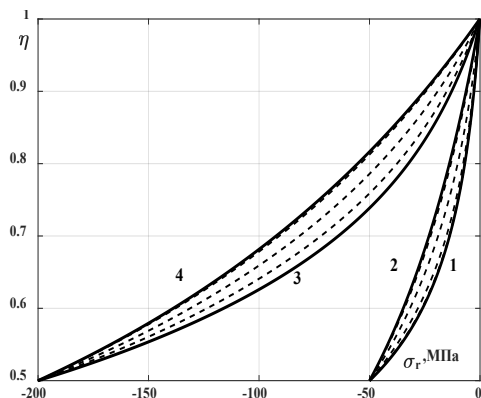


Рис. 4а Эпюры $\sigma_r - \eta$.

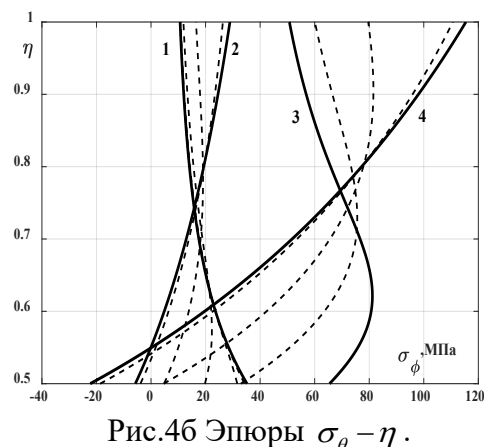


Рис. 4б Эпюры $\sigma_\theta - \eta$.

На основании приведенных рисунков видно, что учет упругих деформаций приводит к существенному перераспределению радиальных и кольцевых напряжений по сечению сферы.

На рис. 5а,б приведено сравнение эпюр радиальных и окружных напряжений для случая нагружения внутренним давлением. Пунктирные линии соответствуют численному решению задачи в ПК КЭМ Simulia Abaqus, сплошные линии — полуаналитическому решению задачи.

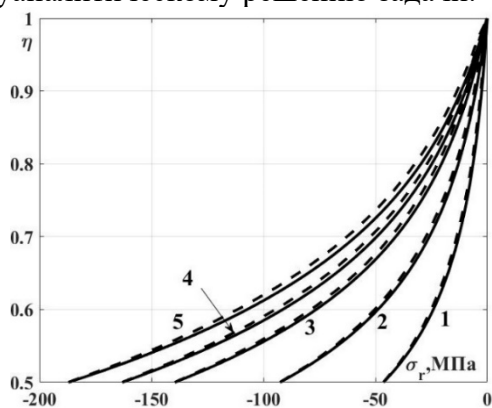


Рис. 5а Эпюры $\sigma_r - \eta$.

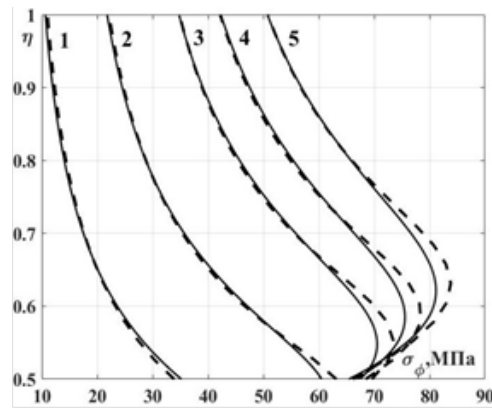


Рис. 5б Эпюры $\sigma_\theta - \eta$.

Погрешность результатов, получаемых при решении задачи в ПК КЭМ Simulia Abaqus, составляет менее 2 % для σ_r и менее 5% для σ_θ .

В разделе 3.3 получены численные решения задач о деформировании типовых для гидравлической системы самолета толстостенных муфт из СПФ, изотермически нагружаемых монотонно возрастающим давлением в режиме МН. В процессе КЭМ используются геометрические характеристики муфтового соединения, приведенные на официальном сайте компании Creofit занимающейся изготовлением ТМС соединений для зарубежных авиационных фирм Grumman Corporation, Airbus, Boeing. Задача решается в двух постановках:

- Закрепление торцов муфты от осевых смещений (деформации в осевом направлении равны нулю) в дальнейшем модель 1.
- Закрепление осевых перемещений по плоскости симметрии, перпендикулярной продольной оси оболочки (напряжения по торцам муфты в осевом направлении равны нулю) в дальнейшем модель 2.

На рис. 6а,б представлены зависимости радиальных перемещений u от величины прикладываемого давления P для муфтового соединения трубопроводов диаметром 6.35мм. Сплошные линии соответствуют внутренним точкам муфты, пунктирные — внешним точкам. Кривые 1,2 — получены при решении задачи в рамках модели 2, кривые 3,4 — при решении задачи в рамках модели 1.

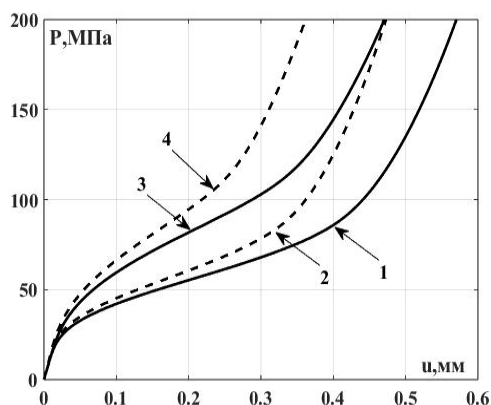


Рис.6а Зависим. $P-u$. Внутр. давление.

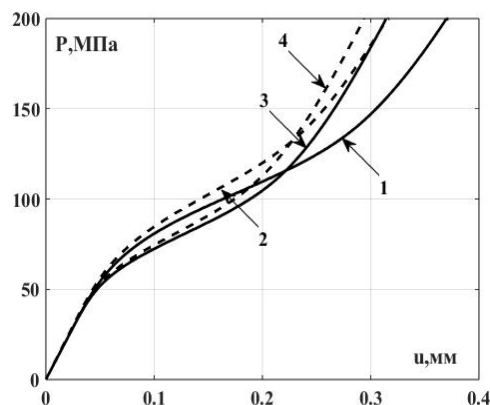


Рис.6б Зависим. $P-u$. Внешн. давление.

Из приведенных рисунков видно, что как в случае действия внутреннего, так и внешнего давлений максимальные радиальные перемещения наблюдаются на внутреннем радиусе муфты. При этом радиальные перемещения как на внешней, так и на внутренней поверхности муфты больше при решении задачи в рамках модели 2.

На рис. 7а,б приведены распределения параметра вида напряженного состояния по сечению муфты для различных этапов нагружения: кривая 1 – соответствует $P = 25 \text{ МПа}$, 2 - $P = 50 \text{ МПа}$, 3 - $P = 75 \text{ МПа}$, 4 - $P = 100 \text{ МПа}$, 5 - $P = 125 \text{ МПа}$, 6 - $P = 150 \text{ МПа}$, 7 - $P = 175 \text{ МПа}$, 8 - $P = 200 \text{ МПа}$. Рассматривается нагружение монотонно возрастающим внутренним давлением. $\xi = r/b$ – безразмерный радиус оболочки.

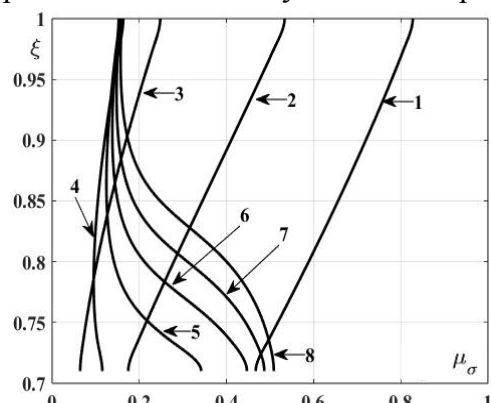


Рис.7а Зависимость $P-\mu_\sigma$. Модель 1.

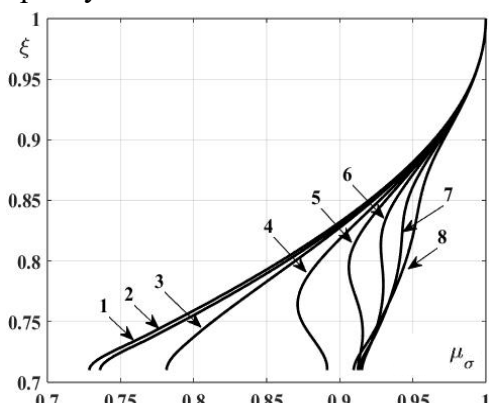


Рис. 7б Зависимость $P-\mu_\sigma$. Модель 2.

Видно, что распределение параметра вида напряженного состояния существенно зависит от величины прикладываемого давления. Следовательно, нагружение не является пропорциональным и при решении данного класса задач нельзя применять положение об активных процессах пропорционального нагружения.

В разделе 3.4 исследуется влияние толщины на НДС цилиндрической муфты из СПФ изотермически нагружаемой внутренним или внешним давлением в режиме МН. Изменение толщины муфты достигается путем варьирования внутреннего радиуса $a = 5, 6.5, 8, 9 \text{ мм}$, при этом внешний радиус оболочки остается неизменным $b = 10 \text{ мм}$. Постановка рассматриваемых задач (граничные условия, значения термоупругих и материальных констант материала) соответствуют данным, используемым в предыдущем разделе. Установлено, что при уменьшении толщины муфты до 1 мм распределение радиальных и окружных напряжений стремиться к линейному, а радиальные перемещения реперных точек муфты из СПФ увеличивается.

Раздел 3.5 проведено сравнение использования 3-х мерных и 2-х мерных осесимметричных КЭ при численном моделировании процесса увеличения внутреннего радиуса цилиндрической муфты из СПФ, изотермически нагружаемой монотонно возрастающим внутренним давлением в режиме МН. Помимо этого определено влияние

количества КЭ по сечению муфты на полученные в результате расчета значения напряжений, перемещений и параметра вида напряженного состояния. Установлено, что использование 2-х мерных осесимметричных КЭ позволяет уменьшить временные затраты на получение численного решения рассматриваемой задачи. Исходя из этого появляется возможность увеличить количества КЭ при моделировании цилиндрической оболочки, что обеспечивает лучшую сходимость решения и повышает точность результатов. В то же время, при использовании пространственной сетки КЭ могут решаться задачи для специальных случаев несимметричного рельефа внутренней поверхности муфты.

Раздел 3.6 посвящен численному моделированию процесса дорнирования при изотермическом нагружении контактным взаимодействием с абсолютно жестким телом в режиме МН. Моделирование рассматриваемого процесса реализуется с помощью итерационного метода, в котором на каждом шаге, соответствующему передвижению муфты на заданное расстояние в осевом направлении, сохраняется НДС предыдущего шага. При решении задачи были приняты следующие гипотезы:

- Дорн моделируется как абсолютно жесткое тело.
- Вся боковая поверхность дорна, находящаяся внутри муфты из СПФ, является областью взаимодействия.
- Коэффициент трения между дорном и муфтой из СПФ равен нулю.
- Взаимодействие дорна и муфты из СПФ моделируется полем перемещений, изменяемым на каждом шаге.

На рис. 8 приведена КЭМ муфты из СПФ смоделированная 3-х мерным типом КЭ C3D8H. Отмеченные сечения обозначают зоны определения перемещений, деформаций и напряжений на различных этапах нагружения. Геометрические характеристики муфты из СПФ и дорна подобраны таким образом, чтобы величина радиальных деформаций на внутренней поверхности деформируемого изделия была равна 2%. В процессе моделирования использовались кинематические граничные условия, учитывающие осевую симметрию тела:

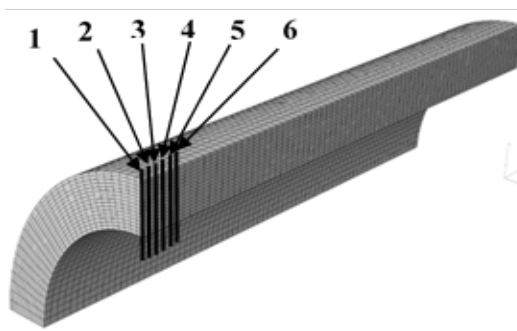


Рис. 8 КЭМ оболочки из СПФ

- Закрепление перемещений в окружном направлении по плоским граням параллельным оси муфты из СПФ.
- Закрепление торца муфты из СПФ, находящегося на максимальном отдалении от дорна, от осевых смещений.

В силу принятых допущений при переходе с конусной на цилиндрическую часть дорна НДС муфты в деформируемой области остается неизменным при продвижении дорна по осевой координате. Исходя из этого в дальнейшем будут рассматриваться только этапы прохождения конусной части дорна вглубь муфты из СПФ.

На рис.9а,б приведены эпюры кольцевых напряжений по сечению муфты из СПФ построенные для различных положений дорна: 1 шаг – соответствует прохождению конусной части дорна вглубь оболочки из СПФ на 1 мм, 4 шаг – на 4 мм.

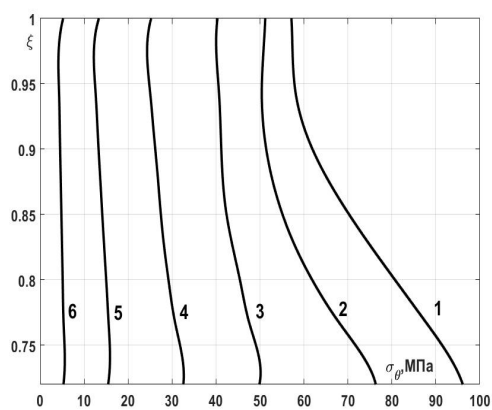


Рис. 9а Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. 1 шаг.

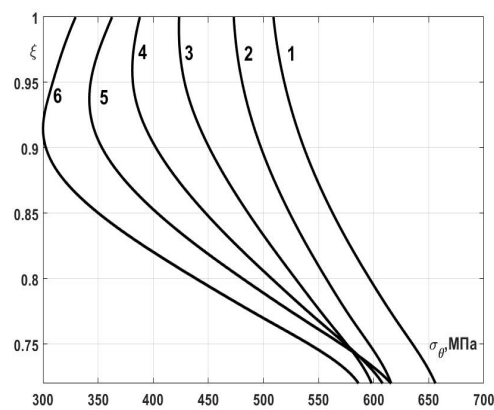


Рис. 9б Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. 4 шаг.

Из рис. 9а,б видно, что кольцевые напряжения немонотонно изменяются при прохождении конусной части дорна вглубь оболочки. Кроме того, вблизи внутренней поверхности оболочки наблюдается резкий рост кольцевых напряжений, а их распределение по сечению становится более нелинейным (рис.9б кривые 5,6).

На рис. 10 приведены распределение осевых напряжений по сечению толстостенной цилиндрической муфты из СПФ. Сплошные линии соответствуют 1 шагу, штриховые – 4 шагу. Кривые 1,2 построены для 2 сечения, 3,4 для 6 сечения. Видно, что при продвижении дорна вглубь муфты из СПФ характер распределения осевых напряжений по радиальной координате стремиться к линейному что характерно для состояния чистого изгиба части оболочки типа балки, вырезанной близко расположенными плоскостями $\theta = const$ с осью, параллельной оси z .

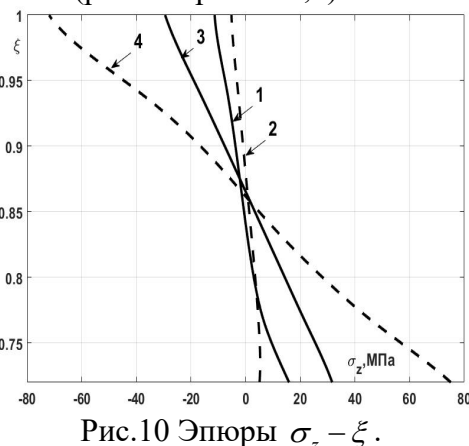


Рис.10 Эпюры $\sigma_z - \xi$.

Раздел 3.7 посвящен определению оптимального способа предварительного деформирования (увеличения внутреннего радиуса) муфты из СПФ при изотермическом нагружении в режиме МН, путем сравнения численных решений задач, изложенных в пункте 3.3, 3.6. В качестве критерия оптимальности выступает НДС муфты в процессе ее предварительного деформирования на заданную величину радиальной деформации, а также сложность самого технологического процесса. Установлено, что лучшим из двух способов увеличения внутреннего радиуса муфты из СПФ является изотермическое нагружение монотонно возрастающим внутренним давлением в режиме МН.

Четвертая глава посвящена моделированию процесса предварительного деформирования муфты из СПФ, нагружаемой постоянным давлением и претерпевающей охлаждение через интервал температур ПМП. При этом учет структурного механизма деформирования в процессе ПМП не рассматривался.

В разделе 4.1 изложена процедура аналитического обращения определяющих соотношений модели нелинейного деформирования при фазовых и структурных превращениях, полученного для связной постановки краевых задач, учитывающая влияние изменения параметра вида напряженного состояния в процессе деформирования на приращение параметра фазового состава. Искомое явное выражение приращений компонент напряжений через приращения компонент деформаций для случая ПМП, сопровождающегося структурным переходом, имеет вид:

$$d\sigma_{ij} = \frac{K(q)\delta_{ij}}{3} \left\{ d\varepsilon_{kk} - 3B \left[2G(q)R_{pq} \left[d\varepsilon_{pq}' - L_{pq} \right] + R_1 d\varepsilon_{kk} - \delta S dT \right] \right\} + 2G(q) \left[d\varepsilon_{ij}' - L_{pq} \right] \quad (2)$$

В соотношении (2) для сокращения записи вводятся следующие обозначения:

$$e = \frac{\Delta G \sigma_i}{3G_A G_M} + \rho_{d1}(\mu_\sigma) F_1(\sigma_i, \mu_\sigma), Q_{mn} = e R_{mn} + \frac{3}{2} \rho_{d2}(\mu_\sigma) q \frac{\partial F_2(\sigma_i, \mu_\sigma)}{\partial \sigma_i} \frac{\sigma_{mn}}{\sigma_i},$$

$$R_{ij} = \frac{3}{2} A_2 \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i} + D_{ij}^1, A_2 = \frac{\left[\rho_{d1}(\mu_\sigma) \left[F_1(\sigma_i, \mu_\sigma) + \sigma_i \frac{\partial F_1(\sigma_i, \mu_\sigma)}{\partial \sigma_i} \right] + \frac{\Delta G \sigma_i}{3G_A G_M} + 3\mu_\sigma c \right] H}{R},$$

$$D_{ij}^1 = \frac{27}{2} \frac{\sigma_{ik}}{(\sigma_i)^2} \frac{\sigma_{kj}}{\sigma_i} \frac{cH}{R}, R = \Delta S + 3B^2 K(q) H, c = \left(\frac{d\rho_{d1}(\mu_\sigma)}{d\mu_\sigma} F_1(\sigma_i, \mu_\sigma) + \rho_{d1}(\mu_\sigma) \frac{\partial F_1(\sigma_i, \mu_\sigma)}{\partial \mu_\sigma} \right)$$

$$H = \frac{\pi(1-q)}{M_s^0 - M_f^0} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi t_\sigma}{2} \right), B = \frac{\Delta K \sigma_{kk}}{3K_A K_M} + \varepsilon_0, \delta S = \frac{H \Delta S}{R}, R_1 = \frac{HBK(q)}{R}, t_\sigma = \frac{M_s^\sigma - T}{M_s^0 - M_f^0}$$

$$dM_s^\sigma = \frac{Ad\sigma_i + Bd\sigma_{kk} + cd\mu_\sigma}{\Delta S}, L_{pq} = \frac{3\sigma_{pq} (2G(q)Q_{mn}d\varepsilon_{mn} - e(\delta S dT - R_1 d\varepsilon_{kk}))}{2(\sigma_i + 3G(q)Q_{mn}\sigma_{mn})}$$

Здесь $d\varepsilon_{ij}$ и $d\varepsilon_{kk}$ - приращение девиатора и шаровой части тензора деформаций соответственно; σ_{ij}, σ_{kk} - девиатор и первый инвариант тензора напряжений; q - объемная доля мартенситной фазы; $K(q), G(q)$ - зависящие от q утроенный объемный модуль и модуль сдвига; δ_{ij} - дельта Кронекера; M_s^0, M_f^0 температуры начала и окончания ПМП в отсутствии напряжений, M_s^σ, M_f^σ - те же величины при наличии напряжений, ΔS_0 - скачки энтропии при переходе от мартенситного к аустенитному состоянию для отчетной температуры T_0 (постоянные материала); ε_0 - линейная деформация объемного эффекта реакции; $\rho_{d1}(\mu_\sigma), \rho_{d2}(\mu_\sigma), F_1(\sigma_i, \mu_\sigma), F_2(\sigma_i, \mu_\sigma)$ - материальные параметры и функции определяющие уравнение диаграммы ПМП (нижний индекс 1) и МН (нижний индекс 2).

В данной главе диссертации рассматривается отдельно частный случай, когда происходит ПМП, но не выполнено одно из условий осуществления структурного перехода $d\sigma_i > 0, \sigma_i(q_1) = \max_{q \in (0, q_1)} \sigma_i(q)$.

В рамках приведенного ниже упрощенного варианта обращения определяющих соотношений в случае отсутствия структурного перехода не учитывается влияние $d\sigma_{kk}$ на dq . Однако в выражении для приращения деформаций учитывается объемный эффект реакции ε_0 и переменность объемного модуля и модуля сдвига при фазовом переходе. В результате явного обращения определяющих соотношений получаем, что приращения компонент напряжений через приращения компонент деформаций для в процессе ПМП без учета структурного механизма деформирования, записывается в виде:

$$d\sigma_{ij} = \frac{K(q)\delta_{ij}}{3} \left\{ d\varepsilon_{kk} - 3B \left[2G(q)R_{pq} \left[d\varepsilon_{pq} - X_{pq} \right] - HdT \right] \right\} + 2G(q) \left[d\varepsilon_{ij} - X_{pq} \right] \quad (3)$$

В соотношении (3) для сокращения записи введено следующее обозначение:

$$X_{pq} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{pq} e(2G(q)R_{mn}d\varepsilon_{mn} - HdT)}{\sigma_i + 3G(q)eR_{mn}\sigma_{mn}}$$

В разделе 4.2 показана процедура разработки и интеграции в ПК КЭМ Simulia Abaqus по технологии UMAT пользовательской модели, реализующей алгоритм численного решения задач деформирования элементов конструкции из СПФ в процессе ПМП. Соотношение (3) позволяет обычным путем получить матрицы жесткости

конечных элементов, связывающие приращения узловых смещений и приращения узловых сил, а также касательную матрицу жесткости системы КЭ, позволяющую решить задачу на каждом шаге уменьшения температуры процесса ПМП. Дифференциальное условие осуществления ПМП, проверяемое на каждом шаге, имеет вид $dq > 0$. Процесс считается завершенным, при выполнении условия $T = M_f^\sigma$ во всем рассматриваемом элементе конструкции из СПФ. При решении модельных задач было установлено, что для получения лучшей сходимости численного решения задачи необходимо использовать метод Static General (Ньютона - Рафсона) с фиксированным шагом. Алгоритм взаимодействия подпрограммы с ПК Simulia Abaqus представлен в виде блок – схемы на рис. 11.

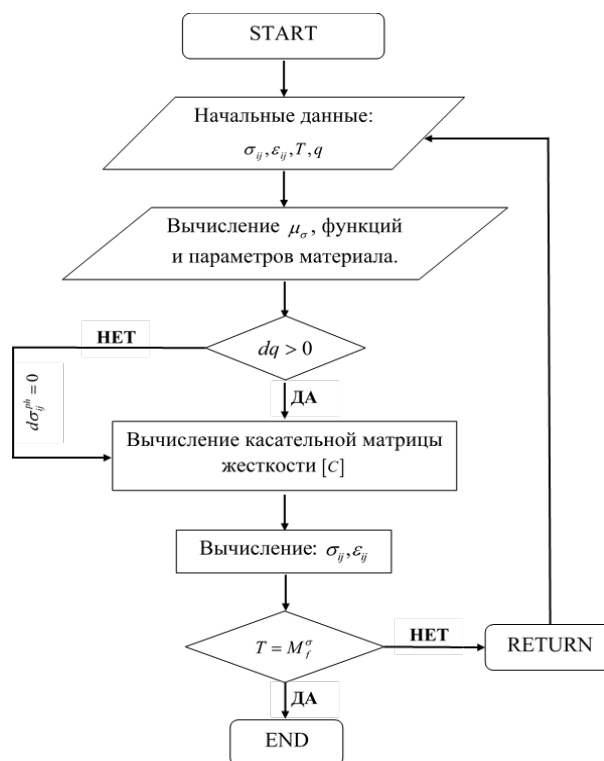


Рис. 11 Блок – схема программы

В разделе 4.2 проведена верификация разработанного программного модуля. В качестве верификационного базиса используется аналитическое решение задачи о деформировании бруса из СПФ с однородным НДС. В рамках рассматриваемой задачи брус находится под действием постоянных растягивающих усилий и претерпевает охлаждение через интервал температур ПМП. При получении аналитического решения задачи считается, что происходит активный процесс накопления неупругих фазовых деформаций, а компоненты тензора девиатора напряжений меняются пропорционального одному параметру, т.е. выполняются условия положения об активных процессах пропорционального нагружения.

Раздел 4.3 посвящен численному моделированию процесса увеличения внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической муфты из СПФ, находящейся под действием постоянного внутреннего давления и претерпевающей охлаждение через интервал температур ПМП. В данном разделе рассматривается процесс накопления неупругих деформаций только за счет фазового механизма деформирования. Считается, что охлаждение происходит медленно и температура в каждый момент времени равномерно распределена по всему объему материала. Решение задач получено с учетом влияния действующих напряжений на характерные температуры фазовых переходов в двух постановках:

- Закрепление перемещений по торцам муфты от осевых смещений (модель 1).
- Закрепление перемещений по оси симметрии муфты (модель 2).

В процессе моделирование реализуются следующий термомеханический процесс, которые для удобства можно разделить на два этапа следующие друг за другом:

1. На первом этапе происходит изотермическое упругое деформирование толстостенной муфты из СПФ монотонно возрастающим внутренним давлением в высокотемпературном аустенитном фазовом состоянии. При этом значение температуры и максимальная величина давления подбираются таким образом, чтобы на момент окончания процесса выполнялось условие $T = M_s^\sigma$ в месте приложения внутреннего или внешнего давления. Выполнение данного условия трактуется необходимостью

нивелирования эффекта сверхупругости в процессе предварительного упругого деформирования. В момент окончания первого этапа значение достигнутого давления $P = 50 \text{ МПа}$ фиксируется.

2. На втором этапе происходит пошаговое охлаждение толстостенной цилиндрической муфты из СПФ под действием постоянного внутреннего давления $P = 50 \text{ МПа}$ от температуры начала ПМП $M_s^\sigma = 330 \text{ К}$ на внутренней поверхности оболочки до температуры окончания процесса на внешней поверхности оболочки $M_f^\sigma = 293 \text{ К}$. На данном этапе происходит накопление фазовых деформаций ПМП и упругих деформаций, связанное с переменностью модулей Юнга при фазовом переходе.

На рис. 12а,б представлены зависимости радиальных перемещений от текущей температуры толстостенной цилиндрической муфты из СПФ. Кривые 1 – соответствует точкам, находящимся на внутреннем радиусе оболочки, 2 – на внешнем радиусе. Сплошная линия соответствует решению задачи, полученному с использованием осесимметричных КЭ типа С3Х4Н, пунктирная – 3-х мерных КЭ типа С3Д8Н.

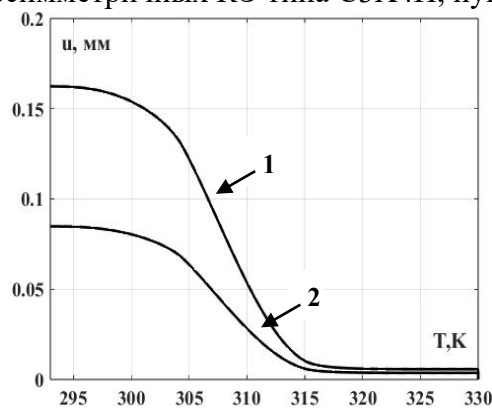


Рис.12а Зависимости $T-u$. Модель 1.

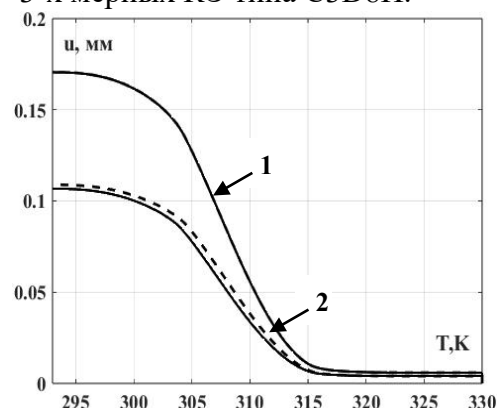


Рис.12б Зависимости $T-u$. Модель 2.

Исходя из приведенных рисунков видно, что радиальные перемещения монотонно растут в процессе ПМП, а результаты, полученные при численном моделировании с использованием различных типов КЭ, хорошо согласуются между собой. Отметим, что при решении задачи в рамках модели 2 наблюдается некоторое расхождение полученных кривых. При этом погрешность получаемых результатов не превышает 1%.

На рис. 13а,б приведены зависимости интенсивности напряжений от q . Кривые 1 построены для точек на внутренней поверхности муфты, 2 – в середине сечения, 3 – на внешней поверхности муфты.

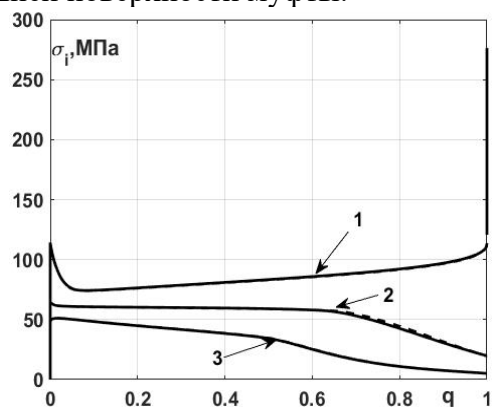


Рис.13а Зависимости σ_i-q . Модель 1.

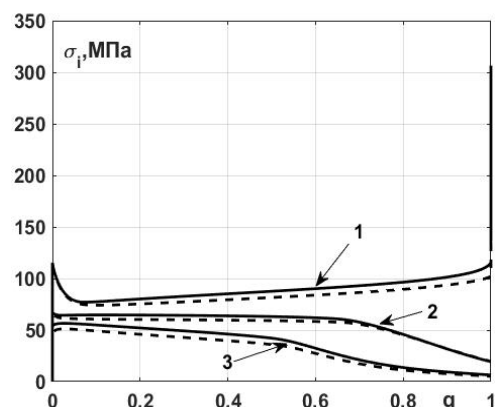


Рис.13б Зависимости σ_i-q . Модель 2.

Как видно из рис. 13 σ_i немонотонно изменяется в процессе охлаждения через интервал температур ПМП во всех точках сечения толстостенной цилиндрической муфты из СПФ. Отметим, что в точке 3 на момент окончания фазового перехода

наблюдается резкий рост интенсивности напряжений, связанный с продолжением ПМП в остальных точках оболочки, точнее движением фронта завершения фазового перехода от внутренней поверхности муфты к ее внешней поверхности. Это явление является конкретной реализацией эффекта «перенапряжения». На основании этого можно заключить, что при решении краевых задач о ПМП в муфте из СПФ, необходимо учитывать возможность протекания структурного перехода. Кроме того, нельзя применять положение об активных процессах пропорционального нагружения и использовать конечные соотношения связывающие величины $\sigma_i, \varepsilon_i, q$. Отметим, что при решении задачи в рамках модели 1, использование различных типов КЭ показали примерно одинаковый результат, в то время как в рамках модели 2 наблюдается, что во всех реперных точках толстостенной цилиндрической муфты из СПФ интенсивность напряжений несколько меньше при решении задачи осесимметричными КЭ типа СЗХ4Н.

Пятая глава посвящена моделированию процесса предварительного деформирования толстостенных сферы и цилиндра из СПФ, нагружаемых постоянным давлением и претерпевающих охлаждение через интервал температур ПМП. В отличие от раздела 4.3 здесь учитывается, как фазовый, так и структурный механизмы деформирования.

В разделе 5.1 показана процедура разработки и интеграции в ПК КЭМ Simulia Abaqus пользовательской модели, реализующей алгоритм численного решения задач о деформировании элементов конструкции из СПФ в процессе ПМП с учетом структурного механизма деформирования. Поскольку определяющие соотношения модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях разрешены относительно приращений деформаций, то для определения $[C]$ требуется их обращение. Искомое явное выражение приращений компонент напряжений через приращения компонент деформаций для случая ПМП, сопровождающегося структурным переходом приведено в разделе 4.3. Соотношение (2) позволяют обычным путем получить матрицы жесткости конечных элементов, связывающие приращения узловых смещений и приращения узловых сил, а также касательную матрицу жесткости $[C]$ системы КЭ, позволяющую решить задачу на каждом шаге уменьшения температуры процесса ПМП. Алгоритм взаимодействия подпрограммы с ПК Simulia Abaqus представлен в виде блок – схемы на рис. 14. Таким образом подпрограмма осуществляет только вычисление матрицы жесткости элемента конструкции из СПФ. Остальные этапы решения задачи используют стандартные алгоритмы ПК КЭМ Abaqus

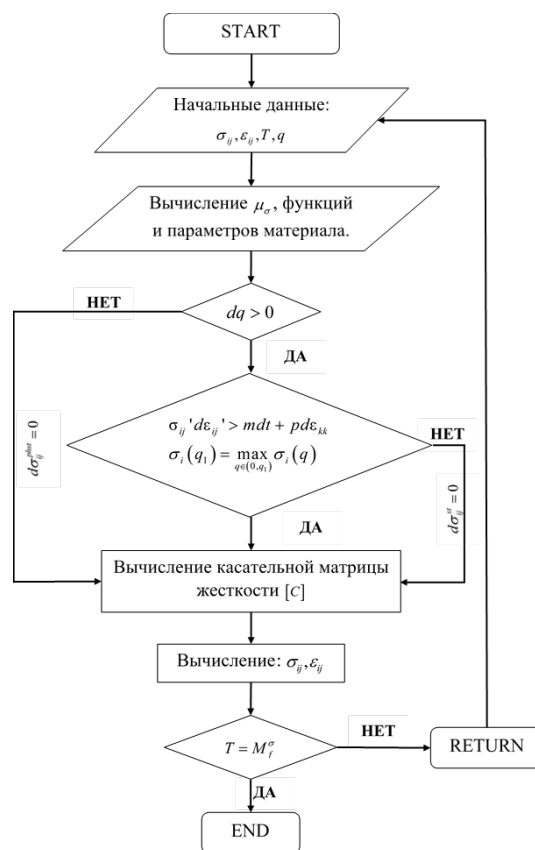


Рис. 14 Блок – схема программы

Дифференциальное условие осуществления ПМП, проверяемое на каждом шаге, имеет вид $dq > 0$. Условия осуществления структурного перехода, проверяемые на каждом шаге интегрирования, имеют вид: $d\sigma_i > 0, \sigma_i(q_1) = \max_{q \in (0, q_1)} \sigma_i(q)$. Процесс считается

завершенным, при выполнении условия $T = M_f^\sigma$ во всем рассматриваемом элементе конструкции из СПФ.

Раздел 5.2 посвящен верификации разработанного программного модуля на модельных задачах с однородным НДС, имеющих решение, сводящееся к одномерной квадратуре. Рассматривается процесс деформирования прямоугольного параллелепипеда, претерпевающего охлаждение через интервал температур ПМП при одноосном (двухосном) нагружении. Считается, что происходит активный процесс накопления неупругих фазовых деформаций, а компоненты тензора девиатора напряжений меняются пропорционально одному параметру, т.е. выполняются условия положения об активных процессах пропорционального нагружения. Погрешность результатов численного моделирования модельных задач, составляет не более 3%.

В раздел 5.3 получено решение связанной задачи о деформировании толстостенной сферы из СПФ, претерпевающей охлаждение через интервал температур ПМП под действием постоянных внутреннего или внешнего давления $P = 100 \text{ МПа}$. На основании полученных решений исследованы процессы перераспределения напряжений на внутренней и внешней границе слоев сферы, связанные с движением по материалу фронта завершения фазового перехода. При этом учитывается как нелинейный по напряжениям эффект ПМП, так и нелинейное влияние структурного перехода. В процессе моделирования реализуется термомеханический процесс аналогичный представленному в разделе 4.3 с тем отличием, что на втором этапе помимо накопления фазовых деформаций ПМП и упругих деформаций связанных с изменением упругих модулей при фазовом переходе, происходит накопление неупругих структурных деформаций в случае выполнения условий активного нагружения $d\sigma_i > 0, \sigma_i(q_1) = \max_{q \in (0, q_1)} \sigma_i(q)$, проверяемых на каждом шаге процесса. Считается, что

охлаждение сферы происходит медленно и температура в каждый момент времени равномерно распределена по всему объему материала. Решение задач получено с учетом влияния действующих напряжений на характерные температуры фазовых переходов.

На рис.15а,б приведены эпюры кольцевых напряжений. Кривые 1 соответствует упругому решению задачи, кривые 2 – этапу охлаждения в тот момент, когда фронт начала фазового перехода достиг внешней поверхности муфты, кривые 3 – этапу охлаждения, когда все сечение оболочки полностью перешло в мартенситную фазу и ПМП завершено, точки – аналитическому решению для упругого поведения. Сплошные линии – соответствуют учету упругого, фазового и структурного деформирования: штриховые – учету упругого и фазового деформирования.

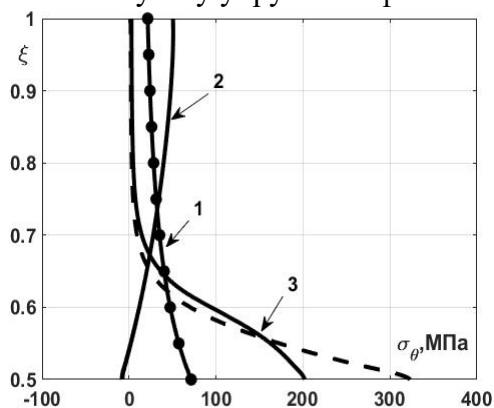


Рис.15а Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. Внутр. давление.

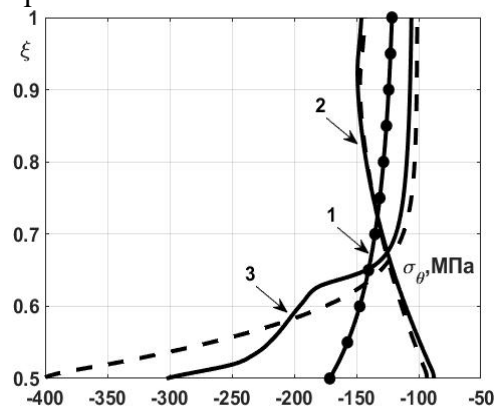


Рис.18б Эпюры $\sigma_\theta - \xi$. Внешн. давление.

На первом этапе рассматриваемого термомеханического процесса (кривая 1) распределение σ_θ по сечению муфты приближенно к линейному. В процессе

охлаждения до момента выхода фронта фазового перехода на внешнюю поверхность сферы наблюдается рост $|\sigma_\theta|$ в верхней половине сечения и существенное убывание $|\sigma_\theta|$ в нижней, так что для случая действия внутреннего давления величина σ_θ даже меняет знак. С момента выхода фронта фазового перехода на внешнюю поверхность сферы и до окончания процесса ПМП наблюдается обратная тенденция. Отметим, что для случая ПМП под действием внутреннего (внешнего) давления значение $|\sigma_\theta|$ на внутренней поверхности сферы в момент завершения фазового перехода больше чем в 2 раза (чуть меньше чем в 2 раза) превосходит ту же величину для упругого решения в аустенитном состоянии. Не учет структурного механизма деформирования, почти удваивает наблюдаемый эффект, который можно классифицировать, как перенапряжение на внутренней поверхности сферы вызванный фазовым переходом.

Раздел 5.4 посвящен определению оптимальных параметров решателя (количества КЭ и шагов итераций по времени) на примере задачи, рассмотренной в предыдущем разделе. Установлено, что при решении краевых задач механики СПФ оптимальными настройками решателя являются 2000 шагов приращений по температуре и рекомендуемый размер 2-х мерного КЭ $f = 0.01 \dots 0.015 \text{ мм}^2$.

Раздел 5.5 посвящен численному моделированию процесса предварительного деформирования толстостенной муфты из СПФ, нагруженной постоянным внутренним давлением $P = 50 \text{ МПа}$ и претерпевающей охлаждение через интервал температур ПМП. В процессе моделирования реализуется термомеханический процесс аналогичный представленному в разделе 5.3. Решение задач получено в двух постановках:

- Закрепление перемещений по торцам муфты от осевых смещений (модель 1).
- Закрепление перемещений по оси симметрии муфты (модель 2).

На рис. 16а,б приведены зависимости интенсивности напряжений от текущей температуры тела. Сплошные линии - соответствуют учету упругого, фазового и структурного деформирования: штриховые – учету упругого и фазового механизма.

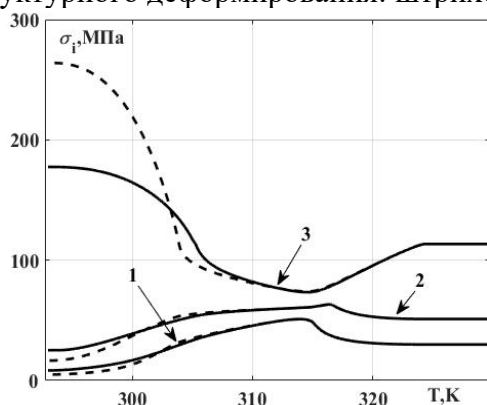


Рис.16а Зависим. $\sigma_i - T$. Модель 1.

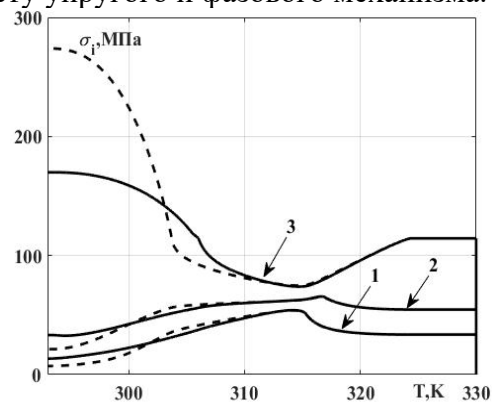


Рис.16б Зависим. $\sigma_i - T$. Модель 2.

На первом этапе охлаждения муфты до выхода фронта фазового перехода на внешнюю поверхность муфты (точка излома на кривой 3) наблюдается рост σ_i для точек находящихся на внешнем радиусе (кривая 1) и в точках соответствующих середине рассматриваемого сечения (кривая 2), что свидетельствует о выполнении условий активного нагружения, и включении структурного механизма в процесс деформирования для данных точек сечения. При этом на внешней поверхности муфты σ_i падает, и условия осуществления структурного механизма деформирования там не выполняются. При последующем охлаждении наблюдается обратная тенденция, т.е. рост σ_i вблизи внутреннего радиуса и падение в остальных точках сечения. Точка изменения производной на кривой 3 свидетельствует о повторном достижении ранее достигнутого

значения $\sigma_i^{\max}$ и соответственно включению структурного механизма деформирования для данных точек сечения. Отметим, что учет структурного перехода приводит к уменьшению σ_i на внутреннем радиусе муфты чуть меньше, чем в 1,5 раза. Наблюдаемая разница между сплошными и пунктирными линиями 1 и 2 после точек максимума связана с тем обстоятельством, что структурный переход происходит в точках с большими значениями радиальной координаты (см. линии 3).

Раздел 5.6 посвящен сравнению способов увеличения внутреннего радиуса муфты из СПФ, рассмотренных в разделах 3.3 и 5.5 и определение из них наиболее оптимального. Метод дорнирования в данном разделе не рассматривается, поскольку в разделе 3.7 было установлено, что при деформировании муфты из СПФ в режиме МН предпочтительным является метод активного изотермического нагружения монотонно возрастающим внутренним давлением. Критерием оптимальности является максимальное значение интенсивности напряжений в мартенситном фазовом состоянии на внутренней поверхности муфты из СПФ, генерируемой в процессе ее деформирования. Выбор критерия обусловлен тем фактом, что чем большие значения этих интенсивностей достигнуты в процессе предварительного деформирования муфты из СПФ, тем менее полным будет возврат к исходной форме при ОМП. Т.е. величина полученных значений интенсивности напряжений непосредственно влияет на надежность и герметичность получаемого ТМС. Решения получены для муфты 5PHS111-10, используемой для соединения трубопроводов диаметром 15.58 мм. В качестве статических условий выступает величина внутреннего давления, значение которого подбирается исходя из рассматриваемой постановки задачи. Параметры рассматриваемых процессов подобраны таким образом, чтобы на момент их окончания величина кольцевых деформаций на внутреннем радиусе муфты из СПФ была равна 4%. Решение задач получено в двух постановках:

- Закрепление перемещений по торцам муфты от осевых смещений (модель 1).
- Закрепление перемещений по оси симметрии муфты (модель 2).

На рис. 5.23 приведены распределения интенсивности напряжений по радиусу муфты. Пунктирная линия соответствует окончанию процесса деформирования муфты из СПФ в процессе ПМП, сплошная линия – нагружению муфты в режиме МН.

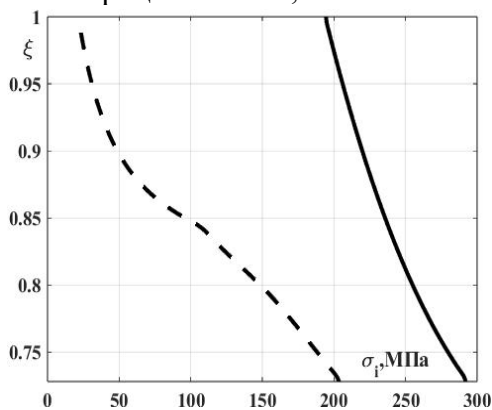


Рис.18а Эпюры $\sigma_i - \xi$. Модель 1.

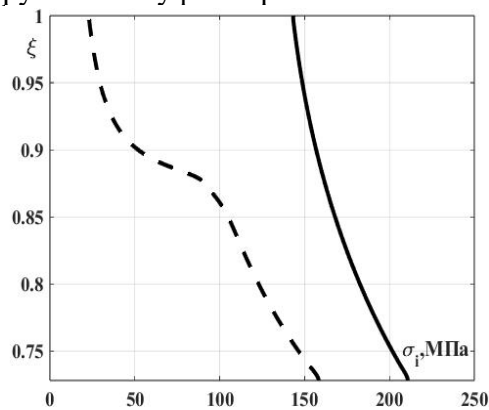


Рис.18б Эпюры $\sigma_i - \xi$. Модель 2.

На основании приведенных рисунков видно, что при одинаковой величине кольцевых деформаций $\varepsilon_\theta = 4\%$ интенсивность напряжений на внутреннем радиусе муфты меньше при деформировании в процессе ПМП. Исходя из этого, можно сделать вывод, что из трех рассматриваемых способов увеличения внутреннего радиуса муфты из СПФ оптимальным является деформирование муфты в процессе ПМП под действием постоянного внутреннего давления.

В **заключении** приведены результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Получены аналитические решения задач деформирования тонкостенных сферы и цилиндра из СПФ в процессе ПМП и режиме МН на базе модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях, распространенной на случай учета влияния на поведение СПФ вида напряженного состояния. Установлено, что величина радиальных смещений полученных в процессе ПМП существенно превышает аналогичные при нагружении в режиме МН.
2. Получено аналитическое выражение определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях для связанной постановки краевых задач, учитывающее влияние изменения параметра вида напряженного состояния на приращение параметра фазового состава.
3. Разработаны алгоритмы численного решения задач о деформировании СПФ в процессе ПМП и режиме МН на базе модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях. Разработаны пользовательские модели, интегрированные в ПК КЭМ Simulia Abaqus посредством процедуры UMAT, реализующие данные алгоритмы. Произведена верификация разработанных программных модулей на модельных задачах с однородным одно и двух – мерным НДС имеющих аналитическое решение.
4. С использованием разработанных программных модулей проведено численное моделирование деформирования толстостенной сферы из СПФ, нагружаемой внутренним или внешним давлением в режиме МН и процессе ПМП.
5. При решении задачи увеличения внутреннего радиуса сферы из СПФ, нагружаемой постоянным давлением и претерпевающей охлаждения через интервал температур ПМП исследован эффект «перенапряжения» вблизи внутренней поверхности сферы, связанный с движением по материалу фронта завершения фазового перехода. Исследовано влияние структурного механизма деформирования в процессе ПМП на наблюдаемый эффект.
6. Получены решения задач о предварительном деформировании толстостенной цилиндрической муфты из СПФ в трех постановках:
 - При активном изотермическом нагружении монотонно возрастающим внутренним давлением в режиме МН.
 - Механическое деформирование муфты из СПФ при температуре мартенситного фазового состояния материала путем дорнирования.
 - Нагружение муфты постоянным внутренним давлением и охлаждение через интервал температур ПМП.
7. На основании полученных решений установлено, что параметра вида напряженного состояния немонотонно изменяется в процессе деформирования и существенно влияет на величину получаемых результатов. Установлено, что при решении данного класса задач нельзя применять положение об активных процессах пропорционального нагружения и использовать конечные соотношения связывающие величины $\sigma_i, \varepsilon_i, q$. Кроме того, при решении краевых задач о ПМП в муфте из СПФ необходимо учитывать возможность протекания структурного перехода.
8. Проведено сравнение трех рассматриваемых в данной работе способов увеличения внутреннего радиуса муфты из СПФ. Установлено, что оптимально проводить предварительное деформирование муфты используя эффект накопления фазово – структурных деформаций в процессе ПМП.

Проведенные в рамках диссертационной работы изыскания в дальнейшем могут быть успешно использованы при проектировании муфтовых ТМС из СПФ.

В **приложении** содержатся тексты разработанных программ на языке Fortran-77, реализующих построенные алгоритмы и текст акта о внедрении.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК РФ:

1. Шарунов, А. В. Решение задач о нагружении тонкостенных сферы и цилиндра из сплава с памятью формы, с учетом разнсопротивляемости материала в режиме мартенситной неупругости / А. В. Шарунов // Механика композиционных материалов и конструкций – 2020. – Т.26. – № 2. – С. 174-189.
2. Саганов, Е. Б. Решение задачи о сфере из сплава с памятью формы, находящейся под действием постоянного давления, с учетом разнсопротивляемости материала / Е. Б. Саганов, А. В. Шарунов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 108-121.
3. Шарунов, А. В. Численный анализ процесса дорнирования соединительной цилиндрической муфты из сплава с памятью формы с учетом влияния на поведение материала вида напряженного состояния / А. В. Шарунов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 359-373.
4. Саганов, Е. Б. Численный анализ процесса раздачи цилиндрической оболочки из сплава с памятью формы, использующего эффект накопления деформаций прямого превращения с учетом влияния вида напряженного состояния / Е. Б. Саганов, А. В. Шарунов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 437-448.
5. Саганов, Е. Б. Сравнение различных типов конечных элементов при численном анализе процесса увеличения внутреннего радиуса муфты из сплава с памятью формы / Е. Б. Саганов, А. В. Шарунов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 167-182.
6. Шарунов, А.В. Сравнение различных способов увеличения внутреннего радиуса толстостенной цилиндрической муфты из сплава с памятью форм / А. В. Шарунов // Труды МАИ. - 2023. - №133. - URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177659> (дата обращения 26.02.2024).
7. Шарунов, А.В. Численное моделирование процесса предварительного деформирования толстостенной муфты из сплава с памятью формы / А. В. Шарунов // Труды МАИ. - 2024. - №134. - URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178461> (дата обращения 29.03.2024).
8. Мовчан, А.А. Эффект перераспределения напряжений в толстостенной сфере из сплава с памятью формы при прямом фазовом превращении под действием постоянного давления / А. А. Мовчан, А. В. Шарунов // Прикладная математика и механика. – 2024. – Т.88. – Вып. 2. – [Принята к публикации].