

На правах рукописи



Муссаев Юсеф Юсефович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С
ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Орёл – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Малинин Владислав Георгиевич

Официальные оппоненты: **Гаврюшин Сергей Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана
(НИУ)», заведующий кафедрой

Богданов Николай Павлович
кандидат физико-математических наук,
доцент, ФГБОУ ВО «УГТУ», доцент

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический
университет»**

Защита состоится «29» мая 2018г. в 14-00 на заседании объединённого диссертационного совета Д 999.191.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92 (12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92 и на сайте <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-999-191-02/mussau-i-uu>.

Автореферат разослан «02» апреля 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Глаголев Вадим Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Материалы, обладающие эффектом памяти формы, отличаются нетривиальной реакцией на термомеханическое воздействие. Известно, что столь необычное поведение материала вызвано перестройкой кристаллической решётки и образованием новой фазы.

В настоящее время сплавы с памятью формы получили распространение в различных отраслях. Существующие нормативные методики, используемые для расчёта напряжённо-деформированного состояния, как правило, основаны на предположении о пропорциональном возрастании нагрузки. Очевидно, что зоны конструкций с максимальными значениями напряжений могут испытывать упругопластическую деформацию. Дальнейшее изменение схемы нагружения приводит к тому, что конструкции работают в условиях реализации сложного деформирования за пределами упругости. Вполне естественно, что конструкции из материалов с памятью могут работать в условиях сложного деформирования. Для адекватного расчёта таких конструкций требуется разработка математического аппарата, который отражал бы действительные физико-механические свойства материалов с памятью.

Большой объём экспериментальных исследований влияния схемы нагружения и деформирования материалов с дислокационным механизмом пластичности выполняется под руководством В.Г. Зубчанинова. Однако, подобных масштабных исследований для материалов с мартенситным механизмом неупругости недостаточно.

Разработка математических моделей должна быть направлена на решение конкретных инженерных задач с учётом влияния вида напряжённого состояния на физико-механические характеристики материала.

Малоизученной является проблема внедрения экспериментально обоснованной математической модели материалов с памятью формы в программы конечно-элементного анализа. Как поясняется ниже подобная задача может быть сведена к адаптации существующих в программах моделей пластического поведения конструкций.

В соответствии с представленными выше материалами тема диссертационного исследования «Экспериментально-теоретическое исследование деформирования конструкций из материалов с памятью формы» является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию процессов простого и сложного деформирования и нагружения материалов с дислокационным механизмом пластичности посвящены работы под руководством В.Г. Зубчанинова. Для материалов с эффектом

памяти формы изучение влияния сложного непропорционального нагружения выполнено в работах Г.В. Малинина, а влияние сложного двухзвенного деформирования на механические характеристики различных сплавов с памятью выполнено под руководством И.Н. Андропова. Однако, исследований сложного деформирования с постоянной кривизной, траекторий в виде спирали Архимеда в пространстве деформаций для сплавов с памятью формы практически нет.

Вопросам решения краевых задач для конструкций из материалов с памятью, формулированию определяющих соотношений посвящены работы С.С. Гаврюшина, А.А. Мовчана, И.А. Волкова, С.П. Беляева, В.А. Лихачёва, В.Г. Малинина и др. Существенным недостатком, как правило, является отсутствие анализа влияния вида напряжённого состояния на механические характеристики, а также описание только пропорционального и близкого к нему силового воздействия.

Достаточно широкое распространение в вычислительной механике материалов с памятью формы получила модель Ф. Ауриччио, которая реализована в программном комплексе Ansys. Экспериментальные обоснования этой модели выполнялись на проволочных образцах и на сплошных стержнях. Подобные экспериментальные исследования обосновывают только одноосное напряжённое состояние материала с памятью формы.

Обратим внимание, что изучению материалов с эффектом памяти формы посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований. Несмотря на этот факт, малоизученными остаются следующие направления:

- теоретическое описание и экспериментальное обоснование влияния сложного деформирования на механические свойства сплавов с памятью;
- аналитическое решение краевых задач механики с учётом градиентных свойств материала с памятью формы;
- применение программных комплексов конечно-элементного анализа для адаптации разработанных математических моделей и численное решение краевых задач механики.

Цель и задачи исследования. Целью выполнения диссертационного исследования является разработка математической модели материалов с памятью при простом и сложном деформировании, проведение натурного эксперимента, а также создание методик решения краевых задач. Для достижения обозначенной цели решаются следующие задачи:

- разработка варианта математической модели, включающей теоретические расчёты изотермического пропорционального и сложного деформирования.

– экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния вида напряжённого состояния на механические характеристики материала;

– аналитическое решение для толстостенной цилиндрической оболочки с учётом влияния градиента деформаций на механические свойства сплава с памятью формы;

– численное решение задач механики с применением программы Ansys Workbench, путём адаптации существующих моделей теории течения, под разработанную модель материалов с памятью формы.

Научная новизна диссертационного исследования определяется следующими полученными результатами:

– Разработана математическая модель, отражающая неупругие свойства материалов с памятью формы при активном изотермическом деформировании, использующая методы структурно-аналитической мезомеханики, позволяющая рассчитать теоретические кривые механического поведения сплавов с памятью формы при пропорциональном и сложном деформировании.

– Экспериментально установлены закономерности поведения материалов с эффектом памяти формы в условиях сложного деформирования.

– Получено аналитическое решение для толстостенной цилиндрической оболочки из материала с памятью для этапов охлаждения и нагрева. Решение получено с учётом градиентных свойств материала.

– Разработана методика использования программы Ansys Workbench для решения краевых задач механики материалов с памятью формы. Решены задачи изгиба тонких пластинок, нагруженных равномерно распределённой нагрузкой при различных заданных кинематических граничных условиях. Предложен вариант практического использования ферменных конструкций из сплавов с памятью формы.

Теоретическая и практическая значимость заключается в получении определяющих соотношений, адекватно описывающих простое и сложное деформирование материалов с памятью формы; на основании этих результатов выполнено решение краевых задач. Практическая ценность работы отражается разработанной методикой использования программных продуктов конечно-элементного анализа (на основании разработанной математической модели) для расчёта напряжённо-деформированного состояния реальных конструкций и изделий.

По результатам диссертационного исследования получен акт внедрения, выданный ООО НТЦ «АПМ».

Методология и методы исследования. Выполнение диссертационного исследования базируется на положениях структурно-аналитической мезомеханики и теории прочности. При выполнении

теоретических исследований используются аналитические и численные методы теории упругости, теории пластичности, строительной механики. Экспериментальные исследования выполняются методами экспериментальной механики.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Теоретические расчёты поведения материала при простом и сложном деформировании по пропорциональным траекториям, траекториям с постоянной кривизной, траекториям в виде спирали Архимеда, двухзвенным траекториям с ортогональным изломом.

2. Экспериментально-теоретические исследования механических свойств сплавов с памятью формы при простом и сложном деформировании, а также сопоставление теоретических кривых с результатами эксперимента.

3. Аналитическое решение для толстостенной цилиндрической оболочки, нагруженной внутренним давлением и неравномерно распределённой по толщине стенки цилиндра температуры с учётом влияния градиента деформаций на механические характеристики сплава с эффектом памяти формы.

4. Методика использования готовых программ конечно-элементного анализа для расчёта конструкций из материалов с эффектом памяти формы. Численное решение напряжённо-деформированного состояния тонких пластинок из материала с памятью различной формы (квадратные, прямоугольные, круглые) и граничными условиями. Вариант применения и расчёт этапа подготовки плоских ферменных конструкций из сплава с памятью формы для создания предварительного напряжения в монолитных железобетонных конструкциях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается качественным и количественным соответствием экспериментальным исследованиям. Справедливость аналитического решения толстостенной цилиндрической оболочки обосновывается использованием классических уравнений теории упругости и пластичности, а также удовлетворение полученными функциями уравнениям равновесия, совместности деформаций, граничным условиям.

Положения диссертационного исследования докладывались на XVI международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности» (Тула, 2015 г.), VIII Международном научном симпозиуме, посвящённом 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова (Тверь, 2015), XI Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-

металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2014).

По теме диссертационного исследования опубликовано 17 научных работ, в том числе 4 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата и доктора наук.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 216 страницах, включая 208 страниц основного текста и состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, списка литературы, включающего 76 наименований и 1 приложения. В диссертации представлено 228 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

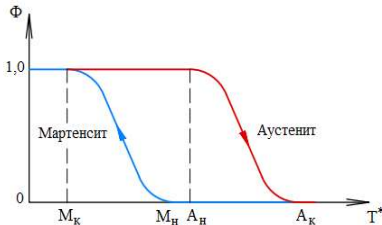


Рисунок 1 – Диаграмма фазового состояния при мартенситных превращениях

Во введении приводится обоснование выбранной темы диссертационного исследования, раскрывается степень её разработанности, цели и задачи исследования, научная новизна, анализируется теоретическая и практическая значимость работы, а также перечисляются методы, методология исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен краткий обзор исторического развития современных тенденций проблемы структурно-механических свойств материалов с эффектом памяти формы при сложном термомеханическом воздействии.

Кинетика мартенситных превращений характеризуется диаграммой фазового состояния, показанной на рисунке 1 – графика зависимости относительного количества мартенсита от эффективной температуры.

С точки зрения механики неупругих деформаций материалов с памятью формы, объемлющей информации, к сожалению, нет.

В литературе представлены объёмные экспериментальные и теоретические исследования материалов с дислокационным механизмом реализации неупругой деформации при сложном нагружении и деформировании, выполненные научным коллективом под руководством В.Г. Зубчанинова.

На сегодняшний день существуют различные теоретические подходы, учитывающие нетривиальное поведение материалов с эффектом

памяти формы при различных режимах термомеханического воздействия. К таковым относятся модели: И.Н. Андропова, А.Е. Волкова – В.А. Лихачёва – А.И. Разова; С.А. Абдрахманова; А.А. Мовчана; Ф. Ауриччио; В.А. Лихачёва – В.Г. Малинина; Г.В. Малинина и др.

Существует большое количество работ, посвящённых решению краевых задач механики для объектов со сложными функционально-механическими свойствами – материалов с эффектом памяти формы, представленные работами А.А. Мовчана, С.С. Гаврюшина, А.Е. Волкова, С.П. Беляева, А.С. Кухаревой, В.Г. Малинина, В.А. Лихачёва, И.Н. Андропова и др.

Главные цели исследований по теме диссертации состоят в том, чтобы разработать и экспериментально обосновать методы прогноза механических свойств материалов с памятью формы при сложных траекториях изотермического деформирования, а также использовать их для создания эффективных приёмов аналитического и численного решения краевых задач.

Во второй главе исследуются процессы сложного деформирования материалов с мартенситным механизмом деформации, формулируется модель деформации материалов с памятью формы и на её основе выводятся критерии возникновения неупругих деформаций при изотермическом нагружении для различных структурных состояний. Особое внимание уделено расчётам деформаций мартенситной неупругости при изотермическом деформировании по двухзвенным траекториям с ортогональным изломом, траекториям деформирования постоянной кривизны, а также траекторий типа «спираль Архимеда».

В соответствии с моделью В.А. Лихачёва – В.Г. Малинина, после ориентационного усреднения скорости изменения тензора микродеформаций β_{ik} , получаем следующее уравнение для расчёта макродеформации:

$$\varepsilon_{ik} = B_{\Phi} \cdot \dot{\Phi} \cdot \hat{\sigma}_{ik} \cdot H(-\dot{T}^*), \quad (1)$$

где ε_{ik} – тензор макродеформаций, возникающих в результате мартенситных превращений; B_{Φ} – коэффициент структурно-механической податливости в условиях мартенситных превращений; Φ – удельное количество мартенситной фазы; $\hat{\sigma}_{ik}$ – девиатор макронапряжений; $H(-\dot{T}^*)$ – функция Хевисайда; T^* – эффективная температура.

Скорость изменения мартенситной фазы определяется выражением:

$$\dot{\Phi} = -\dot{T}^* [H(1 - \Phi)H(-\dot{T}^*)H(M_n - \Phi(M_n - M_k) - T^*)(M_n - M_k)^{-1} + H(\Phi)H(\dot{T}^*)H(T^* + \Phi(A_k - A_n) - A_k)(A_k - A_n)^{-1}], \quad (2)$$

где \dot{T}^* – скорость изменения эффективной температуры; M_n , M_k – температуры соответственно начала и конца прямой мартенситной

реакции; A_n , A_k – температура соответственно начала и конца обратной мартенситной реакции.

Скорость изменения эффективной температуры в соответствии с уравнением Клаузиуса-Клапейрона записывается в виде:

$$\dot{T}^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} \cdot D_i \cdot \dot{\sigma}_i; \quad (T = const); \quad (3)$$

$$\dot{T}^* = -\frac{T_0}{q_0} \cdot D_i \cdot \dot{\sigma}_i = -k \cdot \dot{\sigma}_i; \quad k = \frac{T_0}{q_0} \cdot D_i, \quad (4)$$

где T_0 – температура термодинамического равновесия; q_0 – параметр, характеризующий тепловой эффект реакции; D_i – интенсивность тензора дисторсии мартенситного превращения; $\dot{\sigma}_i$ – скорость изменения интенсивности напряжений.

Для удобства дальнейших вычислений, перейдём к записи определяющих соотношений в интенсивностях напряжений и деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_i = B_\Phi \cdot \dot{\Phi} \cdot \frac{2}{3} \cdot \sigma_i \cdot H(-\dot{T}^*). \quad (5)$$

Таким образом, выражение (5) является инвариантным соотношением для расчёта деформации фазового происхождения на этапе мартенситного превращения, которое следует из определяющих соотношений (1).

Описание неупругих деформаций различной природы неразрывно связано с введением в анализ критерия, запускающего процесс неупругого деформирования. Очевидно, что для решения краевых задач механики для материалов с памятью формы также необходимо сформулировать подобные критерии.

По результатам анализа возможных ситуаций, связанных с фазовыми переходами в материале с эффектом памяти формы при изотермическом деформировании в различных интервалах температур, диаграмму фазового состояния можно разделить на области по температуре и фазовому составу как показано на рисунке 2.

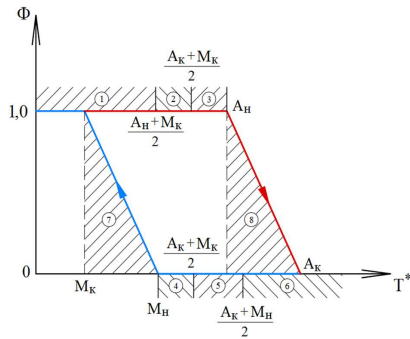


Рисунок 2 – Диаграмма фазового состояния

Выражение для расчёта деформации мартенситной неупругости в интервале температур 3 (по рисунку 2) можно представить в виде формулы (6):

$$\begin{aligned} \varepsilon_i = & B_\phi \cdot \frac{k \cdot \dot{\sigma}_i}{A_k - A_n} \cdot \frac{2}{3} \cdot \sigma_i \cdot H(\sigma_i - \sigma_{н\uparrow}^{M \rightarrow A'}) \cdot H(\sigma_{к\uparrow}^{M \rightarrow A'} - \sigma_i) + \\ & + E \cdot \dot{\sigma}_i \cdot H(\sigma_i - \sigma_{к\uparrow}^{M \rightarrow A'}) \cdot H(\sigma_{н\uparrow}^{A' \rightarrow M'} - \sigma_i) + \\ & + B_\phi \cdot \frac{k \cdot \dot{\sigma}_i}{A_k - A_n} \cdot \frac{2}{3} \cdot \sigma_i \cdot H(\sigma_i - \sigma_{н\uparrow}^{A' \rightarrow M'}) \cdot H(\sigma_{к\uparrow}^{A' \rightarrow M'} - \sigma_i), \end{aligned} \quad (6)$$

где T_d – температура изотермического деформирования; k – параметр, определяемый в соответствии с формулой (4).

Соотношения для расчёта деформации мартенситной неупругости в интервалах температур 1, 2, 4 – 8 (по рисунку 2) также получены в ходе исследования и приведены в диссертационной работе.

Выражения для расчёта напряжений, соответствующих началу и концу мартенситных превращений, определяются формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_{н\uparrow}^{M \rightarrow A'} &= \frac{A_n - T_d}{k}; \quad \sigma_{к\uparrow}^{M \rightarrow A'} = \sigma_{н\uparrow}^{M \rightarrow A'} + \frac{A_k - A_n}{k}; \\ \sigma_{н\uparrow}^{A' \rightarrow M'} &= \frac{T_d - M_k}{k}; \quad \sigma_{к\uparrow}^{A' \rightarrow M'} = \sigma_{н\uparrow}^{A' \rightarrow M'} + \frac{M_n - M_k}{k}. \end{aligned} \quad (7)$$

На рисунке 3 приведены результаты построения теоретических кривых $\sigma - \varepsilon$ для различных интервалов температур изотермического деформирования и при различных структурных состояниях при следующих значениях исходных параметров: $M_n = 60^\circ\text{C}$, $M_k = 45^\circ\text{C}$, $A_n = 79^\circ\text{C}$, $A_k = 94^\circ\text{C}$, $T_d = 293\text{K}$, $k = 5,263 \cdot 10^{-7} \frac{\text{К}}{\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}}$, $\varepsilon_{пц} = 0,168\%$, $B_\phi = 1,611 \cdot 10^{-11} \text{Па}^{-1}$.

Рассмотрим результаты теоретического исследования мартенситной неупругости при изотермическом пропорциональном и сложном деформировании. Для решения поставленной задачи, в рамках предлагаемой модели, необходимо ввести в расчёт дополнительное уравнение, связывающее между собой компоненты тензора напряжений через компоненты тензоров скоростей деформаций, которое предлагается записать в виде:

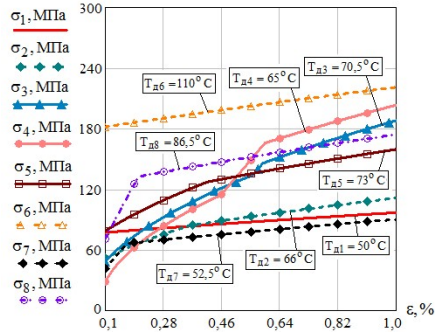


Рисунок 3 – Теоретические кривые в координатах $\sigma=f(\varepsilon)$ для различных структурных состояний

$$\frac{\sigma_{11}}{\sqrt{3} \cdot \sigma_{12}} = \left(\left(\frac{d\varepsilon_{ef}}{dt} \right) / \left(\frac{d\gamma_{ef}^*}{dt} \right) \right)^n, \quad (8)$$

где σ_{11} , σ_{12} – соответственно нормальная и касательная компоненты тензора напряжений; ε_{ef} , γ_{ef}^* – соответственно приведённая линейная и угловая компоненты тензора деформаций, определяемые выражениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ef} &= \varepsilon_{ef}(t) = \varepsilon_{i,ef}(t) \cdot \cos(\alpha(\varphi)); \\ \gamma_{ef}^* &= \gamma_{ef}^*(t) = \varepsilon_{i,ef}(t) \cdot \sin(\alpha(\varphi)), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\varepsilon_{i,ef}$ – приведённое значение интенсивности деформаций; $\alpha(\varphi)$ – параметр, учитывающий несовпадение углов вида напряжённого и деформированного состояния при непропорциональном деформировании и определяемый из эксперимента; φ – параметр, характеризующий вид деформированного состояния при сложном деформировании; $n = \pm 1$ – коэффициент, зависящий от класса траекторий деформирования.

В окончательном виде, получаем следующие выражения для расчёта плоского напряжённого состояния при деформировании по простым траекториям ($n = 1$):

$$\sigma_{11} = \left(\frac{d\varepsilon_{ef}}{dt} \right) \cdot \left(\frac{d\varepsilon_{i,ef}}{dt} \right)^{-1} \cdot \sigma_i; \quad \sqrt{3} \cdot \sigma_{12} = \left(\frac{d\gamma_{ef}^*}{dt} \right) \cdot \left(\frac{d\varepsilon_{i,ef}}{dt} \right)^{-1} \cdot \sigma_i; \quad (10)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\int 2 \cdot A \cdot d\varepsilon_i + C}. \quad (11)$$

Выражения, полученные для траекторий с постоянной кривизной и в виде спирали Архимеда ($n = -1$):

$$\sigma_{11} = \left(\frac{d\gamma_{ef}^*}{dt} \right) \cdot \left(\frac{d\varepsilon_{i,ef}}{dt} \right)^{-1} \cdot \sigma_i; \quad \sqrt{3} \cdot \sigma_{12} = \left(\frac{d\varepsilon_{ef}}{dt} \right) \cdot \left(\frac{d\varepsilon_{i,ef}}{dt} \right)^{-1} \cdot \sigma_i; \quad (12)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\int 2 \cdot A \cdot d\varepsilon_i + C}, \quad (13)$$

где C – константа интегрирования, определяемая из начальных условий. Прочие параметры определяются выражениями:

$$A = \frac{M_n - M_k}{B_\Phi^* \cdot k}; \quad B_\Phi^* = 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot B_\Phi. \quad (14)$$

Выражения (10) – (14) служат для расчёта плоского напряжённого состояния при изотермическом деформировании по простым и

непропорциональным траекториям в интервале температур 1 по рисунку 2.

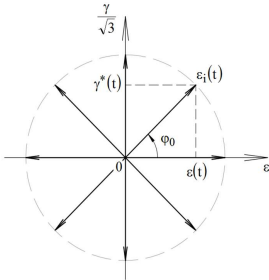


Рисунок 4 – Схема деформирования по пропорциональным траекториям

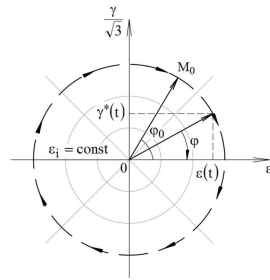


Рисунок 5 – Схема деформирования с ортогональным изломом

Представлен расчёт мартенситной неупругости при изотермических простых и непропорциональных траекториях деформирования. Схема некоторых траекторий деформирования при пропорциональном и сложном нагружении представлены на рисунках 4, 5.

Ниже, приводятся некоторые результаты теоретических расчётов эффекта мартенситной неупругости при активном изотермическом нагружении в пространстве деформаций.

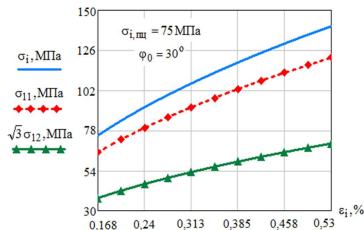


Рисунок 6 – Диаграмма при $\sigma_{ni}=75$ МПа, $\phi_0=30^\circ$ при деформировании по пропорциональным траекториям

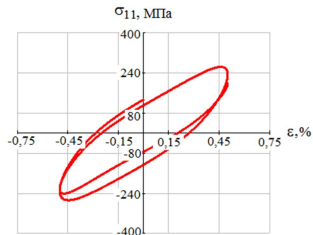


Рисунок 7 – Диаграмма в координатах $\sigma_{11}=\sigma_{11}(\epsilon)$ при деформировании с постоянной кривизной

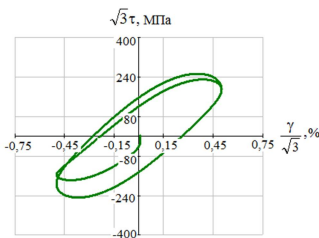


Рисунок 8 – Диаграмма в координатах $\sigma_{12}=\sigma_{12}(\gamma)$ при деформировании с постоянной кривизной

Значения характеристик материала памятью, используемые для расчёта напряжённого состояния приведены в соответствующих параграфах диссертационной работы. На основании математической модели материалов с памятью формы, проведён теоретический анализ влияния истории термообработки на механические характеристики.

Показано, что температурный перепад всего в $\sim 55^\circ\text{C}$ оказывает

существенное влияние на условие начала развития неупругих деформаций мартенситной природы, а также на процесс протекания самой мартенситной реакции.

В третьей главе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования механических свойств материалов с эффектом памяти формы при сложном деформировании.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине (УИМ) СТД, предназначенной для исследования тонкостенных трубчатых образцов в условиях простого и сложного деформирования. Исследования проводились в лаборатории «Мезомеханика и технология наноматериалов и изделий» на базе ФГБОУ ВПО «ГУ-УНПК». Условия проведения экспериментальных исследований на образцах из материала с памятью представлены в диссертационной работе для каждой из траекторий. На рисунках 9, 10 представлены результаты сопоставления экспериментальных и теоретических кривых для некоторых изучаемых классов траекторий.

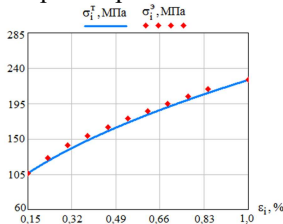


Рисунок 9 – Экспериментальные и теоретические зависимости в координатах $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$

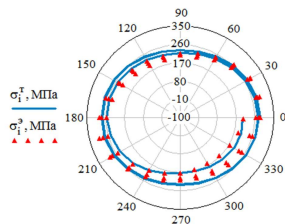


Рисунок 10 – Экспериментальные и теоретические зависимости в координатах $\sigma_i = f(\varphi)$

Во всех случаях отклонение теоретических расчётов от экспериментальных результатов не превышает 12%. Выполненные эксперименты подтверждают влияние вида сложного деформирования на механическое поведение материала, в том числе и на характер диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$.

В четвёртой главе рассматривается задача аналитического расчёта термомеханического соединения (ТМС) с применением толстостенной цилиндрической оболочки из материала с памятью формы.

Принятые при решении задачи гипотезы, основные уравнения, а также силовые граничные условия для рассчитываемой толстостенной цилиндрической оболочки приведены в диссертации. Кроме того, учитывается влияние неоднородности деформированного состояния на механические характеристики материала оболочки.

На рисунке 11 представлены результаты расчёта напряжённого состояния для этапа охлаждения.

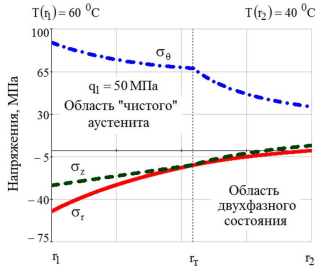


Рисунок 11 – Распределение нормальных напряжений при $t = 0,333t_1$

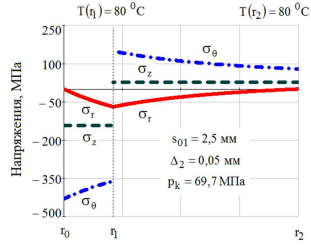


Рисунок 12 – Распределение нормальных напряжений в ТМС

На рисунке 12 приведено распределение нормальных напряжений в сечении термомеханического соединения.

Таким образом, на основании разработанной математической модели материалов с памятью формы, получен аналитический расчёт термомеханического соединения.

В пятой главе приводится численное решение некоторых задач механики для конструкций из материалов с эффектом памяти формы.

Приводится численное решение для квадратной пластинки с шарнирным закреплением по контуру, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой q . Геометрические размеры пластинки: $h=50$ мм – толщина пластинки, $a=b=1000$ мм – размер стороны пластинки. Значения других параметров приведены в диссертации.

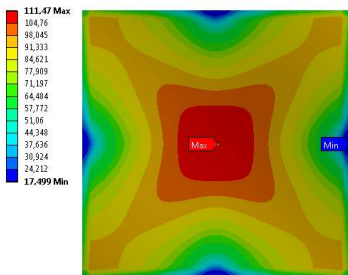


Рисунок 13 – Распределение приведённых напряжений (МПа) в температурном интервале 2

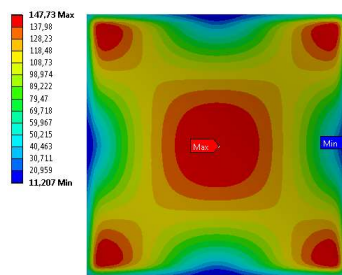


Рисунок 14 – Распределение приведённых напряжений (МПа) в температурном интервале 6

На рисунках 13, 14 приведено распределение напряжений (по Губеру-Мизесу) для различных температурных интервалов (см. рисунок 2) изотермического деформирования при различных структурных состояниях.

В диссертации приведены аналогичные расчёты для круглой и прямоугольной пластинок с различными закреплениями по контуру, а также приведены результаты расчёта напряжённого состояния плоских

ферм, элементы которых изготовлены из материала с ЭПФ, для различных фазовых состояний.

В приложении приведена методика тарировки датчиков экспериментальной установки, а также методика отжига образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальные результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Разработан математический аппарат, позволяющий рассчитать эффекты мартенситной неупругости при изотермическом деформировании материалов с эффектом памяти формы. Рассмотрены простые и сложные траектории деформирования. На основании полученных результатов построены теоретические кривые механического поведения материала.

2. Проведены экспериментальные исследования механического поведения материала при простом и сложном изотермическом деформировании.

3. На основании разработанной математической модели, получено аналитическое решение для толстостенной цилиндрической оболочки из сплава с памятью формы с учётом градиентных свойств материала.

4. Разработана методика использования программных комплексов для расчёта эффектов мартенситной неупругости. Выполнены расчёты некоторых задач механики.

Рекомендации и перспективы исследования. В рамках теоретического анализа возможно рассмотрение дополнительных сложных траекторий деформирования со смещённым центром окружности и спирали Архимеда, двухзвенных траекторий деформирования с произвольным значением угла излома и т.д. Подобные исследования позволят дополнительно обосновать универсальность предлагаемой математической модели материалов с памятью формы. Также дополнительного исследования требуют расчёты эффектов мартенситной неупругости для различных структурных состояний.

По теме диссертационного исследования опубликованы следующие работы:

Публикации в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Малинин, В.Г. Математическое моделирование и численное решение прикладных задач строительной механики для конструкций из материалов с памятью формы [Текст] / В.Г. Малинин, Ю.Ю. Муссауи, Ю.А. Бурдин // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2017. – №2(271). – С.68-76.

2. Малинин, В.Г. Сплавы с эффектом памяти формы: математическая модель, численное решение некоторых задач механики [Текст] / В.Г. Малинин, Ю.Ю. Муссауи

// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – №5(319). – С.9-17.

3. Малинин, В.Г. Исследование мартенситной неупругости сплава Ti-50%Ni при сложных траекториях деформирования в виде спирали Архимеда: результаты эксперимента, математическая модель [Текст] / В.Г. Малинин, **Ю.Ю. Муссауи**, Е.А. Трифонов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. – №1(315). – С.29-34.

4. Малинин, В.Г. Моделирование процессов создания термомеханических соединений с помощью муфт из материалов с памятью формы методами структурно-аналитической мезомеханики [Текст] / В.Г. Малинин, **Ю.Ю. Муссауи** // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №3(311) – С.36-47.

Наиболее значимые публикации в других научных изданиях:

5. Малинин, В.Г. Вопросы практического применения материалов с памятью формы для усиления строительных конструкций [Текст] / В.Г. Малинин, **Ю.Ю. Муссауи**, Ю.А. Бурдин // Строительство и реконструкция. – 2017. – №2(70). – С.23-31.

6. Малинин, В.Г. Построение расчётной модели пробного применения материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в строительных конструкциях при двухзвенных траекториях их деформирования [Текст] / В.Г. Малинин, **Ю.Ю. Муссауи**, А.В. Луферова // Строительство и реконструкция. – 2016. – №5(67). – С.23-30.

7. Малинин, В.Г. Моделирование конструкций из сплавов с памятью формы в качестве предварительно напрягаемой арматуры в монолитных железобетонных конструкциях [Текст] / В.Г. Малинин, **Ю.Ю. Муссауи** // Сборник материалов XVII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». – 2016. – С.102-103.

8. Малинин, В.Г. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния процессов сложного деформирования на эффекты мартенситной неупругости [Текст] / В.Г. Малинин, **Ю.Ю. Муссауи**, Д.В. Ефремов // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы VIII Международного научного симпозиума, посвященного 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора В.Г. Зубчанинова. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный технический университет». – 2015. – С. 54-58.

9. Малинин, В.Г. Моделирование процессов сложного деформирования материалов с памятью формы [Текст] / В.Г. Малинин, **Ю.Ю. Муссауи**, Д.В. Ефремов // XI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство». Том II – 2014. – С.159-164.