

На правах рукописи



Перелыгин Алексей Иванович

**ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ЭФФЕКТЫ
ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ПАМЯТИ ФОРМЫ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Орел – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел).

Научный руководитель **Малинин Георгий Владиславович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Тутышкин Николай Дмитриевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Строительство, строительные материалы и кон-
струкции» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный
университет»;

Серпик Игорь Нафтольевич,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Механика» ФГБОУ ВПО «Брянская государ-
ственная инженерно-технологическая академия»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «ТГТУ» - Тверской государственный
технический университет

Защита состоится «21» мая 2013 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.03, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс».

Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации по адресу <http://vak.ed.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу <http://gu-unpk.ru>.

Автореферат разослан «19» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борзёнков Михаил Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время известно, что на физическом уровне проблема функционально-механического поведения материалов, испытывающих при термомеханическом воздействии обратимые фазовые превращения мартенситного типа, исследована в целом достаточно полно. Выявлены основные кристаллофизические и структурно-механические закономерности формирования эффектов мартенситной неупругости.

Выполнено большое количество экспериментальных исследований, которые демонстрируют разнообразные и нетривиальные эффекты, наблюдаемые в изделиях из материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) при различных режимах термомеханического нагружения, включающих различные виды деформации: изгиб балок, кручение стержней круглого поперечного сечения, различных пластин, пружин и т.д.

В гораздо меньшей степени исследованы закономерности формирования эффектов мартенситной неупругости самого материала, когда необходимо создание методов испытаний гарантирующих однородное и контролируемое напряженное состояние в процессе термомеханического нагружения. Особое значение в этом случае имеют создание методов и исследование материалов с ЭПФ в условиях сложного напряженного состояния, при вариации вида напряженного состояния и истории нагружения. Необходимость таких исследований диктуется проблемой создания определяющих соотношений для решения краевых задач механики деформируемого твердого тела из материалов с ЭПФ.

В последние годы возрос значительный интерес к проблеме формулировки определяющих соотношений, появились различные теории: Андронов И.Н., Абдрахманов С.А., Мовчан А.А., Ауриччио (Auricchio), Бринсон (Brinson), Лагудас (Lagoudas), Патор (Patoor) и т.д. В то же время практически все подходы дают качественный анализ адекватности сформулированных определяющих соотношений по отношению к проблеме влияния вида напряженного состояния на эффекты мартенситной неупругости. Исключением можно назвать лишь апробацию моделей основанных на структурно-аналитической мезомеханике материалов. Отсутствие надежных экспериментальных исследований по влиянию вида напряженного состояния и истории термомеханического нагружения сдерживает решение проблемы тестирования определяющих соотношений и построения адекватных действительности методов решения краевых задач механики материалов с фазовыми превращениями мартенситного типа.

Анализ различных теоретических сведений, позволяет отметить, что в качестве наиболее проработанной теоретической базы для исследования объектов с ЭПФ служит структурно-аналитическая мезомеханика. В то же время отсутствуют методики, которые бы объединили возможности структурно-аналитической мезомеханики и методы экспериментальной механики материалов с ЭПФ с целью создания достаточно простых и надежных вариантов определяющих соотношений позволяющих решать задачи расчета функционально-механических свойств при сложном напряженном состоянии.

Таким образом, исследование влияния вида напряженного состояния на эффекты пластичности превращения и памяти формы является актуальной темой.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», при поддержке Минобрнауки РФ (ГРАНТ № 1.8.08), ГРАНТ для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов высших учебных заведений Минобрнауки России шифр А03-2.10-258.

Объектом исследования является тонкостенная цилиндрическая оболочка, изготовленная из сплава Cu-12%Al-4%Mn, обладающего обратимыми фазовыми превращениями мартенситного типа.

Предметом исследования являются эффекты пластичности превращения и памяти формы.

Целью исследования является выявление закономерностей механического поведения материалов с обратимыми мартенситными превращениями при реализации эффектов памяти формы (ЭПФ) и пластичности превращения (ЭПП) в условиях вариации вида напряженного состояния и термоциклического воздействия через интервал температур фазового превращения мартенситного типа, и на их основе развитие эффективного метода прогноза ЭПП и ЭПФ при сложном напряженном состоянии.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1) Провести информационный поиск работ в отечественных и зарубежных источниках в области экспериментальных и теоретических исследований материалов с ЭПФ для сложного напряженного состояния.

2) Создать методику термомеханических испытаний тонкостенных оболочек из материалов с ЭПФ для сложного напряженного состояния с использованием универсальной испытательной машины.

3) Разработать автоматизированную систему термомеханических испытаний тонкостенных оболочек из материалов с ЭПФ с помощью современных комплексов измерительно-регистрирующей аппаратуры и SCAD-систем.

4) Провести экспериментальные исследования закономерностей процессов пластичности превращения и памяти формы на тонкостенных цилиндрических оболочках из сплава Cu-12%Al-4%Mn при вариации вида напряженного состояния.

5) Предложить соответствующую математическую модель на основе структурно-аналитической мезомеханики, которая с одной стороны должна быть максимально упрощена, и в то же время обязана отражать физическое содержание задачи.

Методология и методы исследования. Теоретические и практические исследования проводились на основе принципа системного подхода. В ходе проведения теоретических исследований использовались методы механики деформируемого твердого тела, структурно-аналитической мезомеханики сред с фазовыми превращениями мартенситного типа, вычислительной механики и программный комплекс Mathcad; при проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов – методы экспериментальной механики для сложных термомеханических режимов нагружения, математической статистики.

Научная новизна полученных результатов:

1. На основе систематических экспериментальных данных о влиянии вида напряженного состояния и режимов термоциклирования на формирование эффектов памяти формы и пластичности превращения сплава Cu-12%Al-4%Mn:

- выявлено, что сплав Cu-12%Al-4%Mn обладает ярко выраженными эффектами памяти формы и пластичности превращения – исследованные характеристики термомеханических гистерезисов обладают высокой стабильностью.

- обнаружена инвариантная зависимость термомеханического гистерезиса в координатах $\varepsilon_i=f(T, \sigma_i)$, которая оказалась одинаковой для всех исследованных видов напряженного состояния;

- установлена линейная зависимость интенсивности деформаций ε_i^{enn} и ε_i^{enp} от интенсивности напряжений, которая не зависит от вида напряженного состояния;

- обнаружено, что при увеличении интенсивности напряжений σ_i характеристические температуры возрастают по линейному закону, а при фиксированном значении интенсивности напряжений σ_i , но различных комбинациях напряженного состояния характеристические температуры фазовых превращений сохраняют постоянные значения.

2. Предложена научно-обоснованная методика верификации параметров модели, характеризующая свойства материала на структурном и макромасштабном уровнях, используемая для теоретического прогноза ЭПФ и ЭПП и сопоставления с экспериментальными исследованиями при различных напряженных состояниях;

3. Предложен вариант математической модели структурно-аналитической мезомеханики, позволяющий сформулировать определяющие соотношения для описания эффектов пластичности превращения и памяти формы при сложном напряженном состоянии.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сопоставлением теоретических решений с экспериментальными данными; применением современных программных вычислительных средств; сравнением с результатами других авторов. Отклонение теоретических данных по отношению к экспериментальным не превышает разброса наблюдаемого в опытах.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что обнаруженная инвариантная зависимость термомеханического гистерезиса в координатах $\varepsilon_i=f(T, \sigma_i)$, установленная линейная зависимость интенсивности деформаций ε_i^{enn} и ε_i^{enp} , характеристических температур от уровня интенсивности напряжений σ_i , при фиксированном значении интенсивности напряжений σ_i и предложенный вариант математической модели структурно-аналитической мезомеханики имеют существенное значение для развития теории деформаций сред с мартенситными превращениями. Выявленная высокая стабильность характеристик термомеханического гистерезиса сплава Cu-12%Al-4%Mn и предложенная научно-обоснованная методика верификации параметров модели имеют практическую ценность при разработке эффективных методов решения краевых задач механики для тел с памятью формы.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. методика термомеханических испытаний тонкостенных оболочек из сплавов Cu-12%Al-4%Mn и Ti-50%Ni для сложного напряженного состояния;
2. автоматизированная система термомеханических испытаний тонкостенных оболочек из материалов с ЭПФ на основе комплекса измерительно-регистрирующей аппаратуры фирмы ОВЕН и SCAD-системы Trace-Mode;
3. результаты экспериментальных исследований закономерностей процессов пластичности превращения и памяти формы на тонкостенных цилиндрических оболочках из сплава Cu-12%Al-4%Mn при вариации вида напряженного состояния;
4. вариант математической модели структурно-аналитической мезомеханики, позволяющий сформулировать определяющие соотношения для описания эффектов пластичности превращения и памяти формы при сложном напряженном состоянии;
5. научно-обоснованная методика верификации параметров модели, характеризующая свойства материала на структурном и макромасштабном уровнях.

Апробация диссертационной работы. Основные научные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на следующих конференциях:

Региональная научно-практическая конференция «Инжиниринг – 2009» (Орел, 2009).

Международная научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов. «Образование, наука, производство и управление» (г.Старый Оскол, 2009г.);

Научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов с международным участием «Образование, наука, производство и управление» (г.Старый Оскол, 2010 г.);

II Всероссийская научно-методическая конференция «Основы проектирования и детали машин» (г. Орел, 2010г.).

По результатам всех перечисленных конференций опубликованы доклады.

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном заседании кафедры «Динамика и прочность машин» ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» 3 апреля 2013 года.

Публикации результатов работы.

Основные результаты и положения диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных сборниках и журналах, определенных перечнем Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации и 8 статей в научных сборниках и журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы составляет 174 страницы, включая 97 рисунков, 5 таблиц, списка литературы из 105 наименований и 5 приложений.

Автор выражает благодарность и признательность соавторам за проведение совместных работ: научному руководителю канд. техн. наук, доценту Малинину Г.В.; д-ру техн. наук, профессору Малининой Н.А., сотрудникам и аспирантам кафедры «Динамика и прочность машин».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, отмечена научная новизна работы, даются краткие аннотации по каждой главе.

В первой главе «Литературный обзор» выполнен анализ исследований механических свойств материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) при сложном напряженном состоянии и анализ существующих подходов математического моделирования деформационных свойств в материалах с ЭПФ. Глава содержит три параграфа. **В первом** представлен анализ физических аспектов упругого и неупругого деформирования различных кристаллических материалов. Акцентируется внимание на физические представления о механизмах деформации у материалов, обладающих ЭПФ. **Второй параграф** посвящен краткому обзору структурно-механических эффектов, наблюдаемых в поликристаллах при иницировании мартенситных реакций. Отмечено отсутствие систематических экспериментальных исследований механических свойств материалов с ЭПФ при сложном напряженном состоянии. Выполненные экспериментальные исследования по влиянию вида напряженного состояния на объекты из материала с ЭПФ, как правило, относятся к опытам в условиях неоднородного напряженного состояния и не могут служить характеристиками материала. **Третий параграф** содержит анализ существующих подходов математического моделирования деформационных свойств в материалах с ЭПФ. Отмечено, что одни из первых работ по описанию поведения материалов с памятью формы появились в середине 1970-х годов в виде публикаций Баумгарта (Baumgart) и Мюллера (Muller). В начале 1980-х появились модели, описывающие сверхупругость и эффект памяти формы: модель Ахенбаха (Achenbach), модель Фалька (Falk) Значительное развитие теории материалов с эффектом памяти формы получено в работах исследователей из России: Абдрахманов С.А., Андронов И.Н., Беляев С.П., Волков А.Е., Лихачев В.А, Малинин В.Г., Малинин Г.В., Малинина Н.А., Малыгин Г.А., Мовчан А.А., Разов А.И., Серпик И.Н., Тутышкин Н.Д. и др.; из США: Бринсон (Brinson), Лагудас (Lagoudas), Шо (Shaw); из Китая: Сан (Sun) и др. Отмечены основные недостатки и преимущества существующих подходов.

Более подробно рассмотрены: микромеханическая модель Бринсон (Brinson); Модель Лихачева В.А., Ермолаева В.А.; Микромеханический подход Мовчана А.А.; структурно-аналитическая теория материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) Лихачева В.А.-Малинина В.Г.; структурно-аналитическая мезомеханика материалов с ЭПФ. Обоснован выбор методов структурно-аналитической мезомеханики, как наиболее полно отражающий основные достижения физики процесса массопереноса при мартенситных реакциях, механики деформируемого твердого тела и термодинамики фазовых превращений мартенситного типа. В заключение представлены выводы по главе.

Во второй главе «Постановка задачи и методы исследования» сформулированы цель и основные задачи работы, представлены методы исследования.

В третьей главе «Экспериментальное оборудование и методы исследования материалов с эффектом памяти формы при сложном термомеханическом нагружении» изложены результаты работы по созданию методов экспериментальных исследований материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в условиях

сложного напряженного состояния и нестационарных термоциклических воздействиях, включающих интервал температур фазовых превращений. Обязательным требованием к выполнению опытов при сложном напряженном состоянии является создание контролируемого однородного напряженного состояния и однородного распределения температуры по рабочей части образца в процессе испытаний, а также полная автоматизация эксперимента с непрерывной регистрацией измеряемых параметров с помощью персонального компьютера. Для решения поставленной задачи на кафедре «Динамика и прочность машин» (ФГБОУ ВПО «Госунiversитете-УНПК») была создана универсальная испытательная машина (рисунок 1), разработаны соответствующие методики, автоматизированный измерительный комплекс и организовано автоматизированное рабочее место экспериментатора.

Задачи подготовки и выполнения экспериментальных исследований включали три основных раздела:

- создание экспериментальной оснастки для испытания цилиндрических оболочек из материалов с ЭПФ при сложном термомеханическом нагружении;
- разработка методов экспериментальной механики по исследованию свойств материалов с ЭПФ при сложном напряженном состоянии и заданной программе термоциклического воздействия через интервал температур обратимых мартенситных превращений;
- выполнение экспериментальных исследований по влиянию вида напряженно-деформированного состояния (НДС) и режимов испытаний на структурно-механические свойства материала с ЭПФ. В качестве материала использовался сплав Cu-12%Al-4%Mn;



Рисунок 1 – Фотография автоматизированного рабочего место и основных блоков УИМ СНТ: 1 – комплекс измерительно-регистрирующей аппаратуры, 2 – рабочая часть 3 – блок растяжения (сжатия)-кручения, 4 – станина, 5 – привод растяжения (сжатия), 6 – привод кручения

Эксперимент проводился на универсальной испытательной машине для термомеханических испытаний: сложное нагружение, температура – УИМ СНТ (рисунок 1), которая позволяет:

- создавать комбинированные режимы растяжения (сжатия) с кручением;
- осуществлять произвольные траектории нагружения в пространстве напряжений при мягком режиме нагружения;
- изучать влияние скорости деформирования на свойства материала;
- исследовать ползучесть материалов;
- изучать функционально-механические свойства материала в режиме сложного нагружения при термоциклировании.

УИМ СНТ позволяет обеспечивать проведение опытов для простого и сложного нагружения образца из различных металлов и сплавов, включая объекты, обладающие эффектом памяти формы. Опытным образцом для проведения испытаний в данной работе служил образец из материала с эффектом памяти формы – сплав Cu-12%Al-4%Mn (рисунок 2).



Рисунок 2 – Фотография образца из материала с ЭПФ (Cu-12%Al-4%Mn)

Комплекс измерительно-регистрающей аппаратуры и аппаратуры управления предназначен для автоматизации процесса измерения параметров экспериментальных исследований и выполняет следующие функции:

- измерение значений деформаций, напряжений и температуры;
- управление узлом термоциклирования;
- управление узлом поддержания осевой нагрузки и крутящего момента в заданных пределах;
- управление узлом нагружения осевой нагрузкой и крутящим моментом до заданного значения;
- экспорт измеренных величин в реляционную базу данных MS Access.

Комплекс измерительно-регистрающей аппаратуры и аппаратуры управления содержит:

- динамометр;
- датчики измерения угловой и линейной деформаций;
- термопару;
- модуль аналогового ввода ОБЕН МВА8;
- модуль дискретного вывода ОБЕН МУ 110-16к;
- преобразователь интерфейса RS485-RS232 ОБЕН АС-3М, с помощью которого модули подключаются к компьютеру.

Выходные токопроводы устройства измерения деформации и динамометра связаны с соответствующими каналами аппаратуры при помощи специальных разъ-

емов. Структурная схема измерительно-регистрирующей аппаратурой представлена на рисунке 3.

Все перечисленные приборы для удобства перемещения и соединения их в единую систему располагаются в отдельном системном блоке.

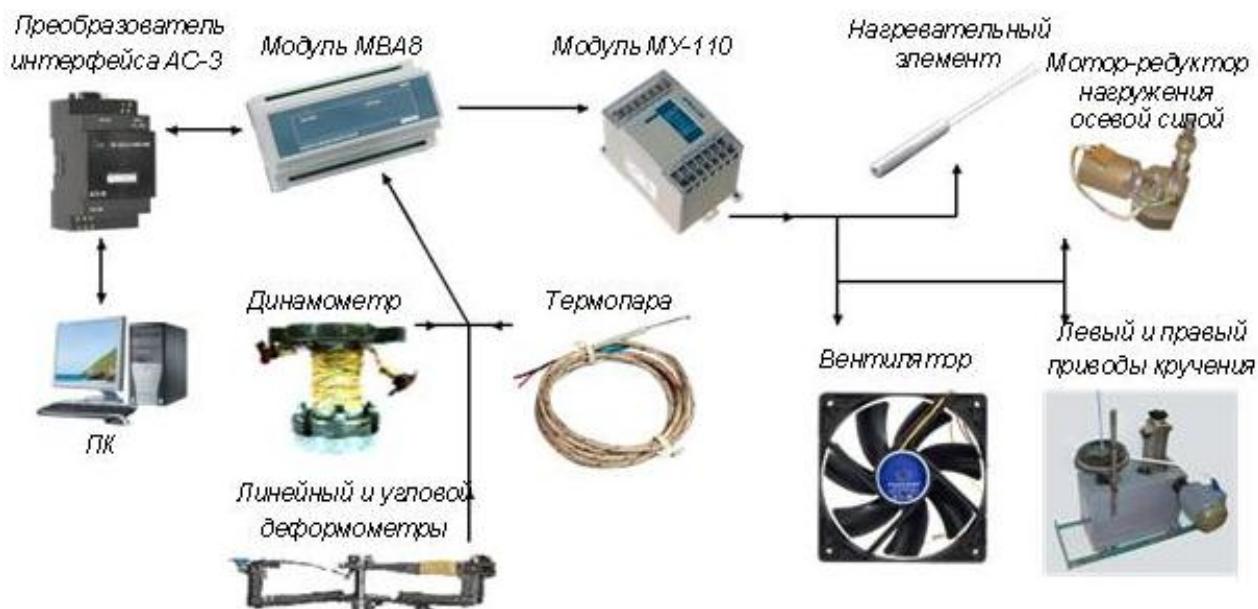


Рисунок 3 – Структурная схема измерительно-регистрирующей аппаратуры и аппаратуры управления

Результаты, приведенные в третьей главе, позволяют детально анализировать основные составляющие оригинальной экспериментальной оснастки, соответствующие методики подготовки и проведения экспериментальных исследований тонкостенных цилиндрических оболочек из материала с эффектом памяти формы.

Созданный метод экспериментальных исследований обеспечивает возможность воспроизводить на рабочей части испытываемого образца однородное температурное и напряженно-деформированное состояния, проводить исследования нетривиальных функционально-механических свойств материала с ЭПФ в условиях сложного напряженного состояния по заданным программам термомеханического нагружения.

Созданный в диссертационной работе автоматизированный измерительный комплекс имеет удобный многооконный интерфейс и позволяет выполнить заданную программу термомеханических испытаний материалов с ЭПФ при сложном напряженном состоянии и термоциклическом воздействии вплоть до вывода обработанных результатов в формате А4, которые могут использоваться в отчетах и научных статьях.

Созданный метод экспериментального исследования применен для выполнения систематического изучения функционально-механических свойств сплава Cu-12%Al-4%Mn при сложном напряженном состоянии в условиях термоциклирования через полный интервал температур фазовых превращений мартенситного типа.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования влияния вида напряженного состояния на термомеханические свойства сплава Cu-12%Al-4%Mn» представлены результаты экспериментальных исследований влияния вида напряженного состояния на термомеханические свойства сплава Cu-12%Al-4%Mn при циклическом температурном воздействии, включающем интервал температур прямого и обратного мартенситных превращений. Опыты выполнялись на тонкостенных трубчатых образцах из сплава Cu-12%Al-4%Mn при различных видах напряженного состояния. Исследовались деформационные эффекты памяти формы и пластичности превращения, влияние уровня напряжений и вида напряженного состояния на характеристические температуры фазовых превращений, закономерности стабилизации термомеханических гистерезисов в процессе циклического изменения температуры, перекрестные эффекты деформации, включающие влияние сдвигового напряжения на осевую деформацию и влияние растягивающего напряжения на угловую деформацию.

Влияние вида напряженного состояния на эффекты памяти формы и пластичности превращения в сплаве Cu-12%Al-4%Mn. В настоящем параграфе представлены результаты исследования пластичности прямого мартенситного превращения и эффекта памяти формы у сплава Cu-12%Al-4%Mn (по массе) при нагреве и охлаждении при различной комбинации растягивающих и сдвиговых напряжений, соотношения между которыми варьировались в широких пределах по заданной программе испытаний (рисунок 4). Всего выполнено пятнадцать режимов испытаний.

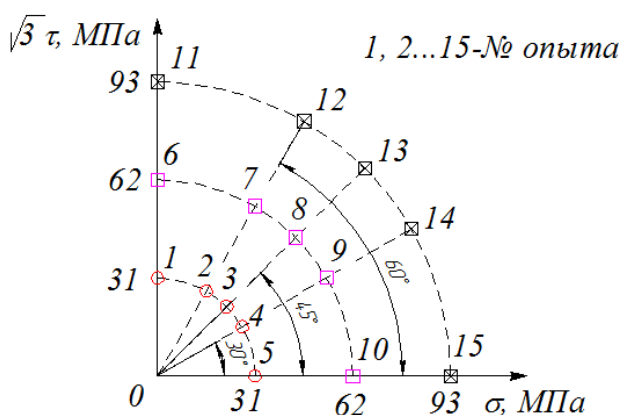


Рисунок 4 – Схема программы испытаний:

- 1 – $\sigma = 0$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 31$ МПа; 2 – $\sigma = 15$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 27$ МПа; 3 – $\sigma = 22$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 22$ МПа; 4 – $\sigma = 27$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 15$ МПа; 5 – $\sigma = 31$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 0$ МПа; 6 – $\sigma = 0$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 31$ МПа; 7 – $\sigma = 31$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 54$ МПа; 8 – $\sigma = 44$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 44$ МПа; 9 – $\sigma = 54$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 31$ МПа; 10 – $\sigma = 62$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 0$ МПа; 11 – $\sigma = 0$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 93$ МПа; 12 – $\sigma = 46$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 81$ МПа; 13 – $\sigma = 66$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 66$ МПа; 14 – $\sigma = 81$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 46$ МПа; 15 – $\sigma = 93$ МПа, $\sqrt{3} \tau = 0$ МПа.

Точками 1-15 показаны соответствующие комбинации напряжений, при которых производили термоциклирование и измерение соответствующих компонент деформаций ε и $\gamma/\sqrt{3}$. Отметим, что программа испытаний содержала три блока характеризующихся в каждом из них постоянным уровнем интенсивности

напряжений σ_i ; $\sigma_i = 31$ МПа, опыты, обозначенные на схеме комбинаций напряжений в виде точек 1-5; $\sigma_i = 62$ МПа, точки 6-10; $\sigma_i = 93$ МПа, точки 11-15. Точки на диаграммном поле $\sqrt{3}\tau - \sigma$ характеризуют соответствующий вид напряженно-го состояния, который сохраняется постоянным в каждом опыте при термоциклировании через интервал фазовых превращений мартенситного типа.

На рисунке 5 построены серии кривых термомеханических гистерезисов в координатах $\varepsilon_i = f(T)$ для различных значений σ_i . Цифры 1-15 указывают на режим испытаний согласно программе на рисунке 4.

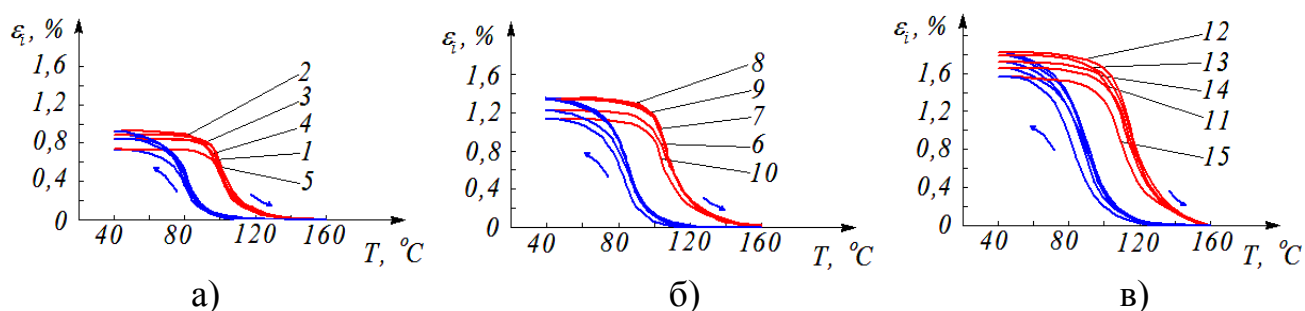


Рисунок 5 – Термомеханические гистерезисы интенсивности деформаций ε_i :
а) $\sigma_i = 31$ МПа, б) $\sigma_i = 62$ МПа, в) $\sigma_i = 93$ МПа

На рисунке 6а представлены графики зависимости максимальных значений амплитуды интенсивности деформаций, характеризующих эффект пластичности превращения $\varepsilon_i^{эпф}$ и эффект памяти формы $\varepsilon_i^{эпф}$. Учитывая, что после второго цикла охлаждения-нагрева петля термомеханического гистерезиса стабилизировалась и практически представляла замкнутый гистерезис, то $\varepsilon_i^{эпф} = \varepsilon_i^{эпф}$. На рисунке 6б приведены графики влияния вида напряженного состояния на величину интенсивности деформации, характеризующих эффект пластичности превращения $\varepsilon_i^{эпф}$ и эффект памяти формы $\varepsilon_i^{эпф}$ в зависимости от величины интенсивности напряжений σ_i .

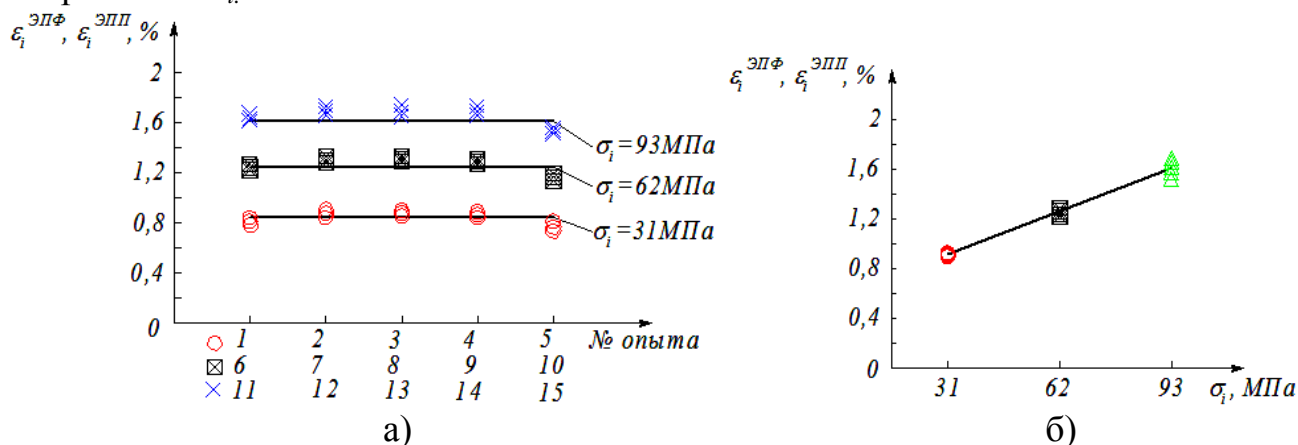


Рисунок 6 – Влияние вида напряженного состояния на величину ЭПФ и ЭПП при постоянной интенсивности уровня напряжений (а) и влияние уровня интенсивности напряжений на величину ЭПФ и ЭПП (б)

Важным результатом является обнаруженная инвариантная зависимость интенсивности деформаций памяти формы и пластичности превращения от интенсивности напряжений. Как видно из рисунка 6а, при фиксированном значении σ_i

величины $\varepsilon_i^{\text{энф}}$ и $\varepsilon_i^{\text{энн}}$ сохраняют свои значения при различных схемах нагружения. На рисунке бб представлены экспериментальные данные влияния величины σ_i на ε_i , демонстрирующие линейную зависимость интенсивности деформаций $\varepsilon_i^{\text{энн}}$ и $\varepsilon_i^{\text{энф}}$ от интенсивности напряжений, которая практически не зависит от вида напряженного состояния.

В заключение можно отметить важность полученных результатов, посвященных выявлению инвариантных характеристик напряженно-деформированного состояния в условиях непрерывных фазовых превращений мартенситного типа. Полученные данные позволяют сформулировать математические модели инженерных методов расчета изделий из материалов, обладающих эффектом памяти формы.

Влияние уровня касательного напряжения и количества термоциклов через интервал температур фазовых превращений на термомеханические свойства сплава Cu-12%Al-4%Mn. В данном разделе представлены результаты экспериментальных исследований кинетики процессов деформационных термомеханических гистерезисов в зависимости от уровня напряжений и количества термоциклов. Опыт выполняли на образце из сплава Cu-12%Al-4%Mn (по массе) в условиях чистого кручения, реализуя ситуации чистого сдвига. С этой целью вначале нагревали образец до температуры 160°C, выдерживали 10 минут без нагрузки при этой температуре, а затем прикладывали крутящий момент заданной величины и производили термоциклирование в интервале $40^\circ\text{C} \leq T \leq 160^\circ\text{C}$, поддерживая постоянное значение крутящего момента. По данным измерения угловой деформации (γ) и температуры (T) строилась зависимость $\gamma/\sqrt{3} - f(T)$. Множитель $1/\sqrt{3}$ при компоненте сдвиговой деформации γ позволял видеть, как изменяется интенсивность деформации $\varepsilon_i = \gamma/\sqrt{3}$. Полученные кривые $\gamma/\sqrt{3} = f(T)$ позволили построить термомеханический гистерезис, определить характеристические температуры мартенситных превращений, т.е. температуры начала и конца процессов накопления и возврата деформаций.

Графики, представленные на рисунке 7а демонстрируют зависимость термомеханического гистерезиса $\gamma/\sqrt{3} = f(T)$ от уровня сдвигового напряжения $\sqrt{3} \tau$.

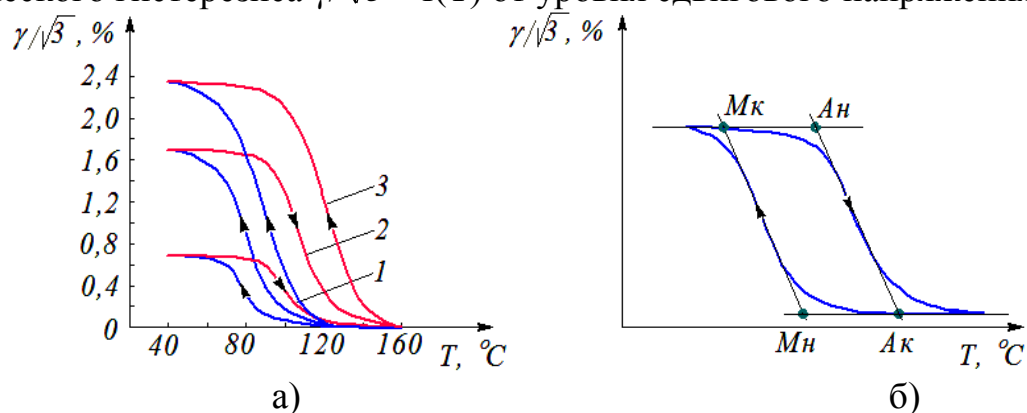


Рисунок 7 – Кривые термомеханического гистерезиса при чистом сдвиге в координатах сдвиговая деформация $\gamma/\sqrt{3}$ -температура T (а): 1- $\sqrt{3} \tau = 31 \text{ МПа}$; 2- $\sqrt{3} \tau = 62 \text{ МПа}$; 3- $\sqrt{3} \tau = 93 \text{ МПа}$ и схема обработки термомеханического гистерезиса (б) для определения характеристических температур

Видно, что кинетика процесса накопления деформации при охлаждении и возврат при нагреве существенно зависит от уровня касательного напряжения. С ростом напряжений наблюдается смещение деформационного гистерезиса в область более высоких температур и происходит изменение всех параметров, характеризующих эффекты памяти формы и пластичности превращения. Анализ экспериментальных данных представлен на рисунке 8-10.

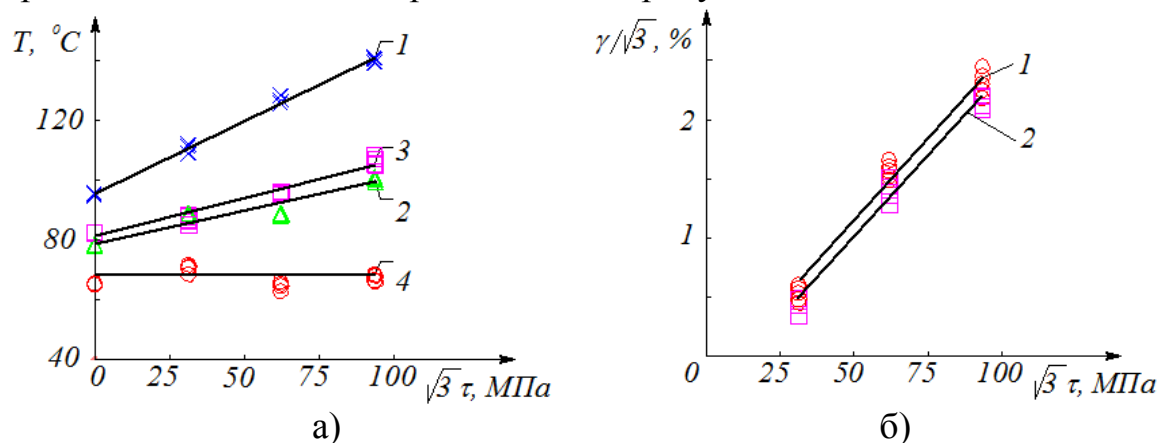


Рисунок 8 – Влияние уровня интенсивности напряжения ($\sqrt{3}\tau$) на характеристические температуры (A_K -1; A_H -2; M_H -3; M_K -4) (а) и на максимальные значения деформации ЭПП ($[\gamma^{\text{ЭПП}}/\sqrt{3}]$ - 1) и ЭПФ ($[\gamma^{\text{ЭПФ}}/\sqrt{3}]$ - 2) (б) при чистом сдвиге

Как видно из рисунка 8а уровень напряжений влияет на характеристические температуры, что хорошо аппроксимируется линейными функциями в координатах характеристические температуры – интенсивность напряжений $\sqrt{3}\tau$. Наибольшая зависимость от уровня напряжений наблюдается для температуры конца обратной мартенситной реакции A_K . Практически отсутствует влияние $\sqrt{3}\tau$ на M_K . Характеристические температуры начала мартенситных реакций M_H и A_H для данного сплава можно считать совпадающими. Как видно из рисунка 8б максимальные значения деформаций ЭПП и ЭПФ находятся в линейной зависимости от уровня приложенного сдвигового напряжения.

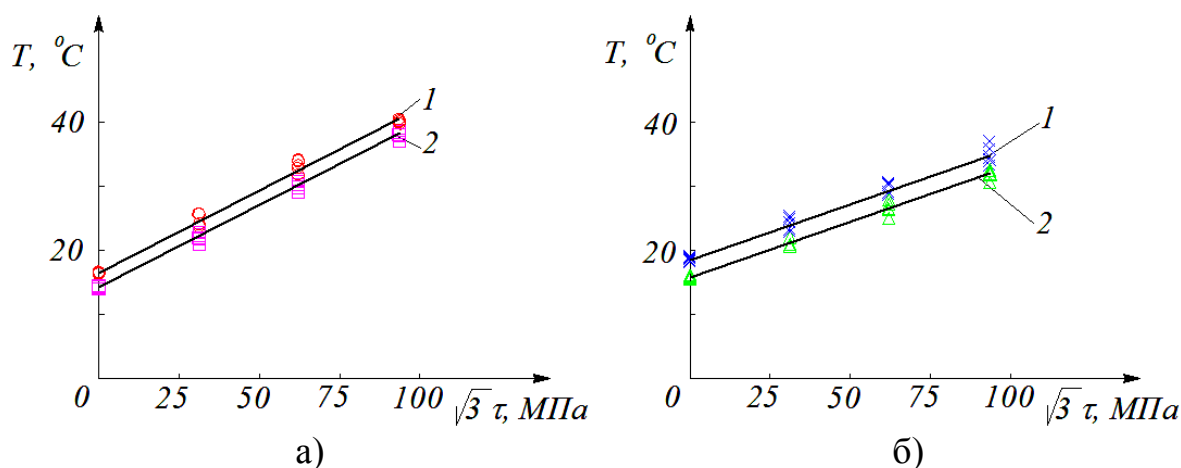


Рисунок 9 – Влияние уровня интенсивности напряжения ($\sqrt{3}\tau$) на максимальные значения величины наклона ($[A_K-A_H]$ -1; $[M_H-M_K]$ -2) (а) и ширину гистерезиса ($[A_K-M_H]$ -1; $[A_H-M_K]$ -2) (б) при чистом сдвиге

Как видно из рисунка 9, ширина гистерезиса и величина наклона прямой и обратной мартенситных реакций характеризуется линейной зависимостью от уровня приложенного напряжения.

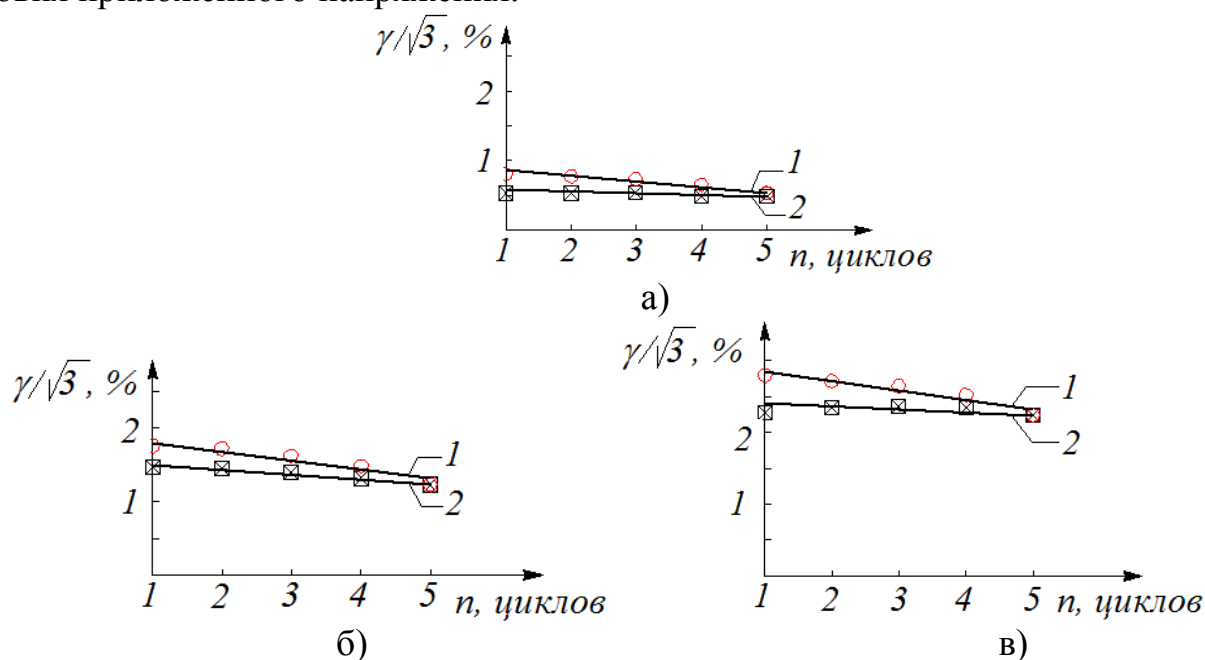


Рисунок 10 – Влияние числа циклов (n) на максимальные значения деформации ($[\gamma^{\text{ЭПП}}/\sqrt{3}]$ -1; $[\gamma^{\text{ЭПФ}}/\sqrt{3}]$ -2) при чистом сдвиге для различных значений интенсивности напряжений:

а) $\sqrt{3} \tau = 31 \text{ МПа}$; б) $\sqrt{3} \tau = 62 \text{ МПа}$; в) $\sqrt{3} \tau = 93 \text{ МПа}$

Как видно из рисунка 10, при увеличении количества циклов изменения температуры наблюдается тенденция к уменьшению незамкнутости петли термомеханического гистерезиса, после трех-пяти термоциклов гистерезис практически стабилизируется и можно считать, что максимальная деформация ЭПП равна деформации ЭПФ.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в данной главе, позволяют отметить, что сплав Cu-12%Al-4%Mn обладает ярко выраженными эффектами памяти формы и пластичности превращения, и что очень важно для инженерных приложений – исследованные характеристики термомеханических гистерезисов обладают высокой стабильностью. Указанные обстоятельства, учитывая стоимость сплава, выдвигают исследованный материал как перспективный аналог эквиацетному никелиду титана в тех областях, где не требуется использование его специальных свойств.

Наиболее важным результатом настоящей главы являются систематические исследования влияния вида напряженного состояния на формирование эффектов памяти формы и пластичности превращения. Обнаружена инвариантная зависимость термомеханического гистерезиса в координатах $\epsilon_i = f(T, \sigma_i)$, которая оказалась одинаковой для всех исследованных видов напряженного состояния, что напоминает инвариантную зависимость $\epsilon_i = \phi(\sigma_i)$ используемую при построении деформационной теории пластичности.

Подробно исследовано влияние уровня напряжений и вида напряженного состояния на характеристические температуры мартенситных превращений. Наибольшее влияние уровня напряжений наблюдается для температуры конца обратимой мартенситной реакции A_K , практически отсутствует влияние напряжений на изменение температуры конца прямого мартенситного превращения M_K . Характеристические температуры начала мартенситных реакций M_H и A_H для данного сплава можно считать одинаковыми. Количество термоциклов через интервал температур фазового превращения не влияет на значения характеристических температур. При увеличении интенсивности напряжений σ_i характеристические температуры возрастают по линейному закону. При фиксированном значении интенсивности напряжений σ_i , но различных комбинациях напряженного состояния характеристические температуры фазовых превращений при прямом и обратном мартенситных превращениях практически сохраняют постоянные значения.

Подводя итог результатам, полученным в четвертой главе, можно отметить их значимость в обосновании возможности использования сплава Cu-12%Al-4%Mn в практических приложениях.

В пятой главе «Методы прогнозирования эффектов памяти формы и пластичности превращения в условиях сложного напряженного состояния» развиваются методы структурно-аналитической мезомеханики для материалов с эффектом памяти формы, в которых проявляется ярко выраженный синергетический эффект, характеризующийся возникновением самоаккомодированных групп мартенситных кристаллов, образующих в процессе инициирования мартенситных реакций протяженные домены, ориентированные в сторону действующих эффективных напряжений τ'_{ik} . Результаты экспериментальных исследований, приведенных в четвертой главе, позволяют сформулировать гипотезы для моделирования эффектов пластичности превращения и памяти формы в исходных макроскопически изотропных поликристаллах. Коротко рассмотрим основные положения используемых гипотез.

1. Принимается концентрационная гипотеза возникновения мартенситного превращения во всех структурных элементах ориентационного пространства при условии образования критического зародыша новой фазы. Критерий формирования критического зародыша формулируется на макромасштабном уровне в терминах эффективной температуры и эффективных напряжений.
2. Постулируется и экспериментально обосновывается обобщенный принцип Клаузиуса-Клапейрона на макромасштабном уровне, который учитывает различный характер химических реакций при прямом и обратном мартенситных превращениях в зависимости от исходного фазового состава.
3. Предполагается, что на структурном уровне возникают самоаккомодированные группы мартенситных кристаллов и пластичность прямого мартенситного превращения определяется возмущающим воздействием девиатора локальных напряжений τ'_{ik} .

4. Механизм фазовых реакций при обратном мартенситном превращении на структурном уровне подчиняется принципу «точно назад».

Согласно предложенным гипотезам записаны определяющие соотношения на микро- и макроуровне:

1. Микромасштабный уровень:

$$\dot{\Phi} = -\dot{T}^* H(T^* - M_K) H(A_K - T^*) \left\{ H(-\dot{T}^*) H \left[M_H - \Phi(M_H - M_K) - T^* \right] (M_H - M_K)^{-1} + \right. \\ \left. + H(\dot{T}^*) H \left[T^* + \Phi(A_K - A_H) - A_K \right] (A_K - A_H)^{-1} \right\};$$

$$\dot{\beta}_{ik} = B_{\Phi} \dot{\Phi} \tau'_{ik} H(-\dot{T}^*) + \beta_{ik} \frac{\dot{\Phi}}{\Phi} H(\dot{T}^*);$$

$$\tau_{ik} = \alpha_{pi} \alpha_{qk} \sigma'_{pq}.$$

2. Макромасштабный уровень:

$$\text{Уравнение Клаузиуса-Клапейрона: } \dot{T}^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} D_i \dot{\sigma}_i,$$

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{D_{ik} D_{ik}}, \sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma'_{ik} \sigma'_{ik};$$

$$\varepsilon_{ik} = \int_{\{S\}} \varphi(S) \int_{\{\Omega\}} f(\Omega) \alpha_{ip} \alpha_{kq} \beta_{pq} dS d\Omega.$$

Здесь Φ – количество мартенситной фазы; $H(x)$ – функция Хевисайда; точка означает производную по времени; M_K, M_H, A_H, A_K – характеристические температуры превращения; B_{Φ} – постоянная; τ'_{ik}, σ'_{ik} – девиаторы напряжений в локальном и лабораторном базисах; β_{ik} и ε_{ik} – деформации, инициируемые прямым мартенситным превращением в локальном и лабораторном базисах; $\{\Omega\}$ – ориентационное пространство, задающее взаимную ориентацию локального и лабораторного базисов; α_{ik} – направляющие косинусы, переводящие локальный базис в лабораторный; $\{S\}$ – статистические переменные, характеризующие структурную неоднородность ширины гистерезиса фазового превращения; T_0 – температура термодинамического равновесия; q_0 – тепловой эффект реакции; D_{ik} – дисторсия превращения в локальном базисе.

Сформулированные гипотезы получили хорошее экспериментальное обоснование в экспериментальных исследованиях на макромасштабных образцах.

Методика верификации параметров модели. В определяющие уравнения варианта математической модели входят параметры материала, характеризующие свойства материала на структурном и макромасштабном уровнях. Обозначенные параметры необходимо определить из соответствующих экспериментов. Отметим, что для калибровки параметров модели можно использовать экспериментальные данные при любом напряженном состоянии, однако методически целесообразно выполнить испытание на чистый сдвиг тонкостенных трубчатых образцов, так как в этом случае отсутствуют погрешности, обусловленные влиянием температурного расширения.

Характерной особенностью рассматриваемой математической модели является наличие констант на структурном и макромасштабном уровне, отражающих

физическое содержание соответствующего уровня. В то же время, в силу связности аналитических соотношений, указанные параметры группируются в комплексы констант, объединяющие параметры структурного и макромасштабного уровней. Для макроскопического описания поведения вещества достаточно знать величины именно названных комплексов, а для их определения использовать экспериментальные данные, полученные в макроопытах. Это, естественно, не закрывает возможности применения структурных методов физического материаловедения и методов экспериментальной термодинамики для оценки параметров на структурном уровне.

В определяющие уравнения входят следующие параметры: характеристические температуры мартенситных превращений: M_H , M_K , A_H , A_K ; температура термодинамического равновесия T_0 :

$$T_0 = \frac{1}{4}(M_K + M_H + A_K + A_H),$$

Для определения обозначенных параметров достаточно иметь результаты опытов в условиях чистого сдвига для двух значений касательных напряжений, характеризующих диаграммы термомеханического гистерезиса в координатах $\varepsilon_i = \varepsilon_i(T, \sigma_i)$ (рисунок 11).

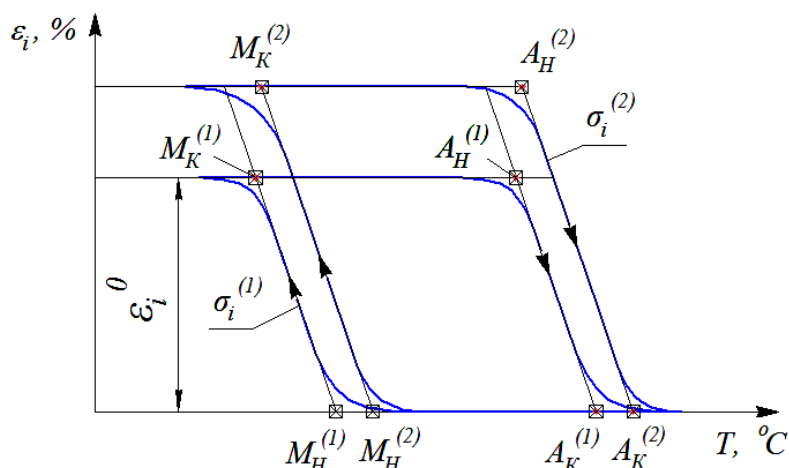


Рисунок 11 – Диаграммы термомеханического гистерезиса для двух значений интенсивности напряжений $\sigma_i^{(2)} > \sigma_i^{(1)}$

Для вычисления константы B_Φ , согласно формуле (1), определим величину ε_i^{max} при $T^* \leq M_K$ для заданной величины σ_i^0 . При

$$T^* = M_K, \varepsilon_i = \varepsilon_i^{max} = \varepsilon_i^0(\sigma_i) = \frac{2}{3} B_\Phi \sigma_i^0$$

$$B_\Phi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i^0}{\sigma_i^0} \quad (1)$$

Обозначим комплекс параметров $\frac{T^0}{q} D_i$ через символ K и выпишем уравнения для расчета характеристических температур начала мартенситных реакций M_H для двух значений интенсивности напряжений $\sigma_i^{(1)}$ и $\sigma_i^{(2)}$:

$$M_H^{(1)}(\sigma_i^{(1)}) = M_H + K\sigma_i^{(1)}, M_H^{(2)}(\sigma_i^{(2)}) = M_H + K\sigma_i^{(2)}. \quad (2)$$

Из заданных критериальных соотношений получим:

$$K = \frac{M_H^{(2)}(\sigma_i^{(2)}) - M_H^{(1)}(\sigma_i^{(1)})}{\sigma_i^{(2)} - \sigma_i^{(1)}} \quad (3)$$

Таким образом, имея экспериментальные данные по термомеханическому гистерезису для двух значений интенсивности напряжений можно определить параметры модели, которые сохраняют свои значения для прогноза эффектов памяти формы и пластичности превращения для любого вида напряженного состояния.

Для определения характеристических температур M_H , M_K , A_H , A_K и параметра модели B_ϕ сплава Cu–12%Al–4%Mn проводился эксперимент при чистом сдвиге при $\sigma_i = 31$ МПа (рисунок 12а).

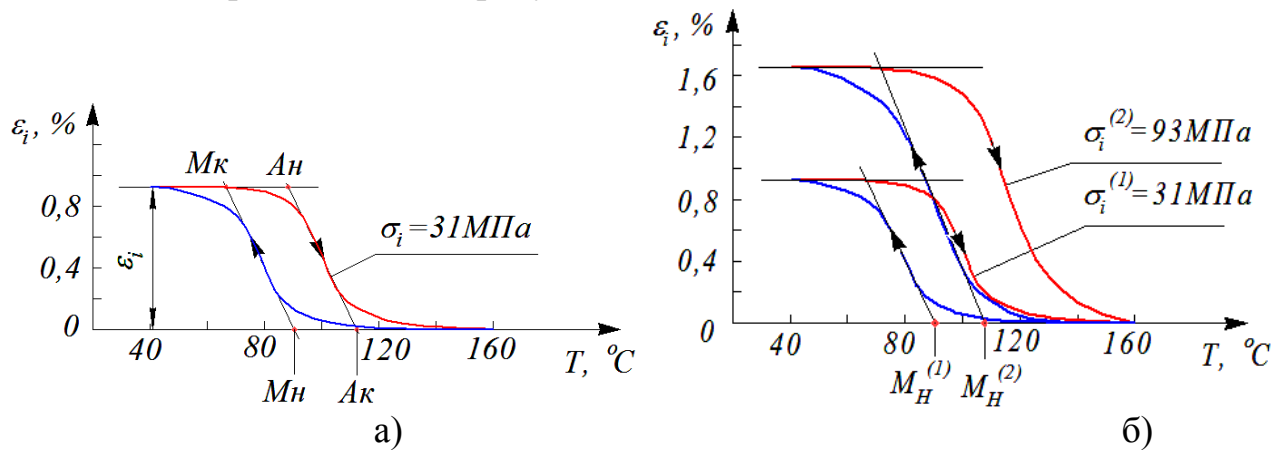


Рисунок 12 – Диаграммы термомеханического гистерезиса при чистом сдвиге

С помощью этой диаграммы находились характеристические температуры $M_K=64$ °C; $M_H=90$ °C; $A_H=86$ °C; $A_K=112$ °C и величина интенсивности деформации ε_i^{max} . По формуле (1) определяется параметр модели $B_\phi=4,35 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹].

Для определения параметра модели K сплава Cu–12%Al–4%Mn проводился эксперимент при чистом сдвиге при разных интенсивностях напряжения (рисунок 12б) и по формуле (3) рассчитывалась величина параметра $K=0,29$ [°C/МПа].

Полученные значения характеристических температур, параметров K и B_ϕ для сплава Cu–12%Al–4%Mn использованы в следующих разделах для теоретического прогноза ЭПФ и ЭПП и сопоставления с экспериментальными исследованиями при различных напряженных состояниях.

Теоретический прогноз кинетики формирования термомеханического гистерезиса и сопоставление с экспериментальными исследованиями при сложном напряженном состоянии. В данном разделе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния вида напряженного состояния на термомеханический гистерезис сплава Cu–12%Al–4%Mn. Формула для расчета диаграмм деформации, характеризующая кинетику развития пластичности превращения, согласно выбранной математической модели имеет вид:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{ik}^{III} = & B_{\phi} \sigma'_{ik} \left\{ \frac{1}{2\Delta(M_H - M_K)} \left(M_H - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right)^2 H(M_H - M_K - \Delta) \times \right. \\
& \times H\left(T - \kappa\sigma_i - M_H - \frac{\Delta}{2}\right) * H\left(M_H - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2}\right) + \\
& + \frac{1}{(M_H - M_K)} (M_H - T + \kappa\sigma_i) H(M_H - M_K - \Delta) H\left(T - \kappa\sigma_i - M_K - \frac{\Delta}{2}\right) \times \\
& \times H\left(M_H - T + \kappa\sigma_i - \frac{\Delta}{2}\right) + \\
& + \frac{1}{\Delta} \left[M_K - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2} + \frac{1}{2(M_H - M_K)} \left\langle (M_H - M_K)^2 + \left(M_H - T + \kappa\sigma_i - \frac{\Delta}{2}\right)^2 \right\rangle \right] \times \\
& \times H(M_H - M_K - \Delta) H\left(T - \kappa\sigma_i - M_K + \frac{\Delta}{2}\right) H\left(M_K - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2}\right) \left. \right\} \quad (4)
\end{aligned}$$

Формула (4), как показывает анализ, весьма удовлетворительно описывает кинетику накопления деформации на этапе охлаждения.

На рисунке 13а представлены графики, иллюстрирующие эффекты пластичности превращения для различных видов напряженного состояния. Сплошные линии представляют результаты теоретического расчета вычисленные по формуле (4) в среде MathCad, пунктирные линии характеризуют экспериментальные данные. Отклонение теоретических данных, по отношению к экспериментальным, не превышает разброса наблюдаемого в опытах. Необходимо отметить, что для калибровки параметров модели достаточно выполнить опыт при одном напряженном состоянии, например при чистом сдвиге.

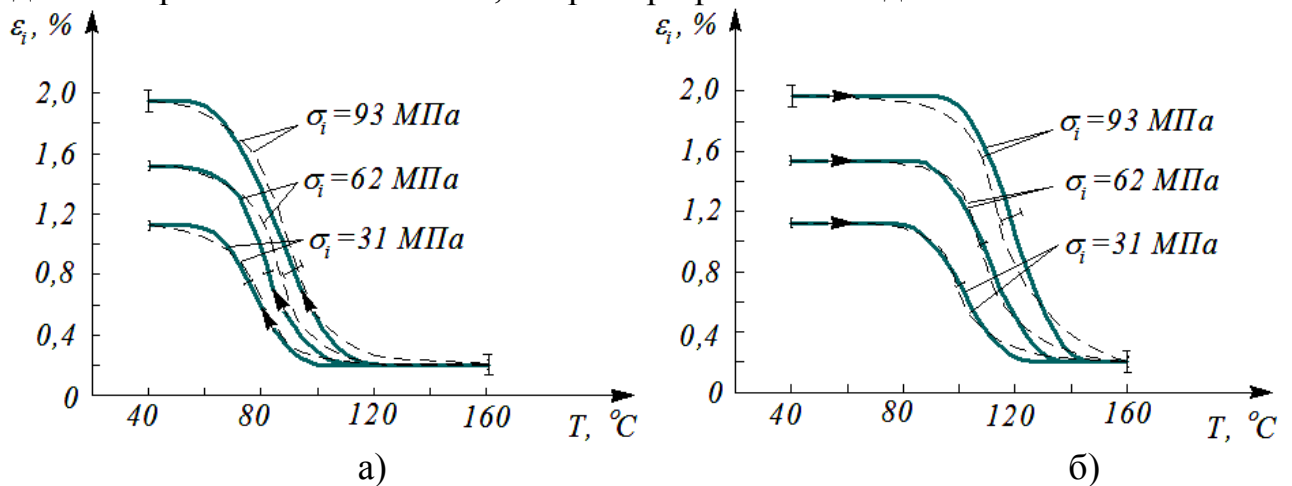


Рисунок 13— Графики пластичности превращения (а) и эффекта памяти формы (б) в координатах: интенсивность деформаций ε_i – температура T .

При выводе формулы (5) предполагалось, что началу обратного фазового перехода предшествовала сообщенная материалу предварительная деформация ε_{ik}^0 за счет активного нагружения мартенсита или в результате пластичности прямого мартенситного превращения, которую математический объект устойчиво сохранял при температуре $T < M_K - \Delta/2$. По мере нагрева эта деформация возвращалась, что и было классифицировано как эффект памяти формы.

Вычисления, на деталях которых мы не останавливаемся из-за их громоздкости, позволили получить следующее общее выражение для восстанавливающей деформации:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ik}^{\text{ПФ}} = \varepsilon_{ik}^0 \cdot H(A_K - A_H - \Delta) \cdot \left\{ \frac{1}{\Delta} \left(A_H - T + k\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right) + \frac{1}{2\Delta(A_K - A_H)} \right\} \times \\ \times \left[(A_K - A_H)^2 - \left(A_K - T + k\sigma_i - \frac{\Delta}{2} \right) \right] \cdot H \left(T - k\sigma_i - A_H + \frac{\Delta}{2} \right) \cdot H \left(A_H - T + k\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right) + \\ + \frac{1}{(A_K - A_H)} (A_K - T + k\sigma_i) \cdot H \left(T - k\sigma_i - A_H - \frac{\Delta}{2} \right) \times \\ \times H(A_K - T + k\sigma_i) + \frac{1}{2\Delta(A_K - A_H)} \left(A_K - T + k\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right)^2 H \left(T - k\sigma_i - A_K + \frac{\Delta}{2} \right) H(A_K - T + k\sigma_i) \end{aligned} \quad (5)$$

Формула (5) справедлива для материалов с узким гистерезисом фазового превращения, когда $\Delta = A_K - M_H < A_K - A_H$, что соответствует сплаву Cu-12 %Al-4 %Mn. Данная формула приводит к довольно простой и согласующейся с опытом кинетики восстановления деформации при нагреве. Она содержит в средней части температурного интервала формовосстановления, линейный относительно температуры фазового перехода, участок. В начале и в конце графика возврата деформации наблюдаются квадратичные отрезки с положительной и отрицательной кривизной, соответственно.

На рисунке 13б представлены графики, иллюстрирующие эффекты памяти формы для различных видов напряженного состояния. Сплошные линии представляют результаты теоретического расчета по формуле (5) в среде MathCad, пунктирные линии характеризуют экспериментальные данные.

Таким образом, методы структурно-аналитической мезомеханики естественно описывают термомеханический гистерезис при сложном напряженном состоянии в условиях $\sigma_i = \text{const}$, что обеспечивает возможность его расчета в рамках инженерных задач механики материалов.

Анализируя полученные теоретические и экспериментальные результаты можно отметить, что предложенный вариант математической модели позволяет применять эффективные и простые методы расчета нетривиальных деформационных свойств пластичности превращения, памяти формы и термомеханического гистерезиса в условиях сложного напряженного состояния для выполнения расчетов инженерных конструкций из материалов с ЭПФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований в диссертации содержится решение задачи по исследованию влияния вида напряженного состояния на эффекты пластичности превращения и памяти формы, имеющей существенное значение для развития теории деформаций сред с мартенситными превращениями.

Основные результаты и выводы

1) проведен информационный поиск работ в отечественных и зарубежных источниках в области экспериментальных и теоретических исследований материалов с ЭПФ для сложного напряженного состояния, который показал отсутствие систематических экспериментальных исследований по влиянию вида напряженного состояния на свойства материалов с ЭПФ;

2) создана автоматизированная система термомеханических испытаний тонкостенных оболочек из материалов с ЭПФ на основе комплекса измерительно-регистрающей аппаратуры фирмы ОВЕН и SCAD-системы Trace-Mode, позволяющая проводить экспериментальные исследования на современном высоком уровне;

3) разработана методика термомеханических испытаний тонкостенных оболочек из сплавов Cu-12%Al-4%Mn и Ti-50%Ni для сложного напряженного состояния, позволяющая гарантировать однородное напряженное и температурное состояние испытываемых тонкостенных оболочек;

4) на основе систематических экспериментальных данных о влиянии вида напряженного состояния и режимов термоциклирования на формирование эффектов памяти формы и пластичности превращения сплава Cu-12%Al-4%Mn:

- выявлено, что сплав Cu-12%Al-4%Mn обладает ярко выраженными эффектами памяти формы и пластичности превращения – исследованные характеристики термомеханических гистерезисов обладают высокой стабильностью.

- обнаружена инвариантная зависимость термомеханического гистерезиса в координатах $\varepsilon_i = f(T, \sigma_i)$, которая оказалась одинаковой для всех исследованных видов напряженного состояния;

- выявлена линейная зависимость интенсивности деформаций $\varepsilon_i^{эпн}$ и $\varepsilon_i^{эпф}$ от интенсивности напряжений, которая не зависит от вида напряженного состояния;

- обнаружено, что при увеличении интенсивности напряжений σ_i характеристические температуры возрастают по линейному закону, а при фиксированном значении интенсивности напряжений σ_i , но различных комбинациях напряженного состояния характеристические температуры фазовых превращений сохраняют постоянные значения.

5) предложена научно-обоснованная методика верификации параметров модели, характеризующие свойства материала на структурном и макромасштабном уровнях, используемая для теоретического прогноза ЭПФ и ЭПП и сопоставления с экспериментальными исследованиями при различных напряженных состояниях;

6) предложен вариант математической модели структурно-аналитической мезомеханики, позволяющий сформулировать определяющие соотношения для описания эффектов пластичности превращения и памяти формы при сложном напряженном состоянии.

Полученные научные результаты следует внедрить при разработке эффективных методов решения краевых задач механики для тел с памятью формы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных высшей аттестационной комиссией при министерстве образования и науки российской федерации

1. Перелыгин, А.И. Исследование влияния вида напряженного состояния на эффект памяти формы методами структурно-аналитической мезомеханики [Текст] / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин, А.И. Перелыгин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – №2(292). – С.3-7.

2. Перелыгин, А.И. Метод прогноза эффекта пластичности превращения при сложном напряженном состоянии на основе развития структурно-аналитической мезомеханики [Текст] / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин, А.И. Перелыгин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – №2(292). – С.18-22.

3. Перелыгин, А.И. Экспериментальное исследование эффектов мартенситной неупругости при сложном термомеханическом нагружении [Текст] / Г.В. Малинин, А.И. Перелыгин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – №6-2(296). – С.36-41.

Другие публикации

4. Перелыгин, А.И. Структурно-механическая модель среды с мартенситными превращениями [Текст] / В.Г. Малинин, А.И. Перелыгин, Д.В. Ефремов // *Сборник научных трудов «Инжиниринг – 2009»*. - Орел, ОрелГТУ, 2009. - С. 29-34.

5. Перелыгин, А.И. Влияние вида напряженного состояния на эффекты памяти формы и пластичности превращения в сплаве Cu-12%Al-4%Mn [Текст] / В.Г. Малинин, А.И. Перелыгин, А.А. Савельев // *Международная научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов «Образование, наука, производство и управление»: Сборник научных и научно-методических докладов*. – Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, 2009. - Т.2 - С. 250-254.

6. Перелыгин, А.И. Влияние истории термомеханического воздействия и вида напряженного состояния на характеристические температуры фазовых превращений сплава Cu-12 % Al-4 % Mn [Текст] / Г.В. Малинин, А.И. Перелыгин, Д.В. Ефремов // *Международная научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов «Образование, наука, производство и управление»: Сборник научных и научно-методических докладов*. - Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, 2009. - Т.1 - С. 278-280.

7. Перелыгин, А.И. Влияние термоциклирования на величину термомеханического гистерезиса и характеристические температуры сплава при чистом сдвиге [Текст] / Г.В. Малинин, А.И. Перелыгин, Д.В. Ефремов // *Международная научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов «Образование, наука, производство и управление»: Сборник научных и научно-методических докладов*. - Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, 2009. - Т.1 - С. 285-289.

8. Перелыгин, А.И. Исследование эффектов памяти формы и пластичности превращения при комбинированном нагружении сдвиговым и растягивающим напряжением [Текст] / Г.В. Малинин, А.И. Перелыгин, Д.В. Ефремов // *Международная научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов «Образование, наука, производство и управление»: Сборник научных и научно-методических докладов*. - Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, 2009. - Т.1 - С. 281-284.

9. Перелыгин, А.И. Расчет эффектов памяти формы методами структурно-

аналитической мезомеханики [Текст] / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин, А.И. Перельгин, С.В. Щербаков, Р.М. Шахбанов // Научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов с международным участием «Образование, наука, производство и управление»: Сборник научных и научно-методических трудов. - Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, 2010. - Т.1.- С. 221-222.

10. Перельгин, А.И. Методика и расчет эффект пластичности превращения на основе развития структурно-аналитической мезомеханики [Текст] / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин, А.И. Перельгин, С.В. Щербаков, Р.М. Шахбанов // Научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов с международным участием «Образование, наука, производство и управление»: Сборник научных и научно-методических трудов. - Старый Оскол, СТИ НИТУ МИСиС, 2010. - Т.1.- С. 218-220.

11. Перельгин, А.И. Исследование вида напряженного состояния на термомеханический гистерезис материалов с эффектом памяти формы [Текст] / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин, А.И. Перельгин, С.В. Щербаков, Р.М. Шахбанов // Материалы 2-й Всероссийской научно-методической конференции «Основы проектирования и детали машин». - Орел, ОрелГТУ, 2010. - С. 165-170.

Подписано в печать 17.04.2013
Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ № 1710

Госуниверситет – УНПК
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
Отпечатано в ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»