

На правах рукописи



Малухина Ольга Андреевна

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СФЕРИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ
ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Научный руководитель

Филиппов Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Официальные оппоненты:

Малинин Владислав Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», профессор кафедры «Инженерная графика и механика»

Болобов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», профессор кафедры «Машиностроение»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 19.06.2018 г. в 16⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.229.30 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, лабораторно-аудиторный корпус, аудитория кафедры «ТКМ и М».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Кункин
Сергей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Эффект памяти формы (ЭПФ) в настоящее время обнаружен более чем у 20 сплавов. Лидером среди материалов с памятью формы по применению и изученности является никелид титана, обладающий высокой механической прочностью, хорошими характеристиками памяти формы, способностью восстанавливать первоначальную (заданную) форму после значительной деформации (до 6%) и развивать реактивные напряжения, достигающие предела прочности. Эти характеристики делают никелид титана наиболее используемым в различных областях науки и техники.

На сегодняшний день хорошо изучены свойства и структура сплавов никелида титана. Это позволяет прогнозировать функционально-механическое поведение материала при изменении температуры через интервал фазовых переходов. Сплавы никелида титана наиболее часто используют в качестве термочувствительных элементов. Условия, при которых элементы выполняют функциональные свойства, создаются при изменении температуры, деформации и напряжения. Например, совмещая силовые и деформационные свойства элементов из сплава с памятью формы, удастся проектировать исключительно простые и эффективные устройства и механизмы. Но следует подчеркнуть, что если однократная реализация эффекта памяти формы в каком-либо механизме может быть предсказуема, то повторение циклов нагрев↔охлаждение, обусловленное генерацией реактивных усилий, неизбежно приводит к релаксации напряжений и недовозврату заданной деформации, поэтому нерешенным остается вопрос об обеспечении стабильности структуры и свойств материала элемента.

В связи с расширением сферы применения сплавов с ЭПФ возрастает интерес к устойчивости активных элементов из сплавов на основе никелида титана. Одними из таких элементов являются деформируемые элементы в виде сферического сегмента, у которых стрела подъема (прогиба) много меньше радиуса кривизны ($f \ll R$). Выполнение регулирующей функции сферическими сегментами в температурном диапазоне состоит в реализации эффекта памяти формы, генерации и релаксации реактивных напряжений в интервале мартенситных превращений. Однако возникает проблема управления функционально-механическими свойствами данных элементов. Актуальность данной работы определяется тем, что свойства памяти формы сферических сегментов в момент потери устойчивости при теплосменах в интервале мартенситного превращения практически не изучены. Отсутствуют систематические исследования по влиянию структурного состояния материала, влиянию термической и пластической обработки на деформационно-силовые характеристики сферических сегментов. Изучение закономерностей изменения функционально-механических свойств при многократном циклировании через интервал мартенситных превращений позволит создать оригинальный конструктивный элемент с широкими возможностями использования на практике.

Целью работы являлось выявление закономерностей влияния способов термомеханической обработки, конструктивных параметров на формирование функционально-механических свойства сферических сегментов из сплавов никелида титана.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать технологию изготовления сферических сегментов и методику исследования их термомеханического поведения при термоциклировании в интервале мартенситных превращений (МП).

2. Изучить влияние структурного состояния сплавов никелида титана и гистерезиса фазового превращения на ЭПФ сферических сегментов, сопровождающийся высокими реактивными напряжениями в полцикле нагрева.

3. Определить степень накопления остаточной деформации после восстановления формы сферических сегментов в режиме многократно повторяющихся циклов через интервал МП и возможность оптимизации ЭПФ в изотермических условиях.

4. Экспериментально исследовать влияние геометрических параметров сферических сегментов на уровень генерируемых и релаксируемых напряжений в режиме термоциклирования в интервале МП.

5. Установить особенности механического поведения сферических сегментов после длительного временного и температурного воздействия.

Достоверность полученных экспериментальных результатов, обеспечена тщательной проработкой экспериментальных методов исследования, многократным повторением опытов, воспроизводимостью результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Экспериментальные результаты влияния состава, пластической и термической обработки на термомеханические свойства и работоспособность сферических сегментов в интервале температур МП. Особенности формоизменения и влияния геометрических параметров на генерируемые напряжения, реализующиеся в момент потери устойчивости прогнутых в мартенсите сферических сегментов, на этапе обратного МП.

2. Соотношениях геометрических параметров сферических сегментов (D/R , h/R) при которых реализуются максимальные реактивные напряжения. Зависимость максимальных реактивных напряжений от структурного состояния сплава и гистерезиса фазового перехода. Характерные диаграммы прогиба сегментов в мартенсите, отражающие общую закономерность изменения реактивных сил при отогреве, которые позволяют прогнозировать уровень развивающихся усилий.

3. Закономерности изменения функционально-механических свойств сферических сегментов в режиме многократно повторяющихся циклов через интервал МП.

Научная новизна результатов исследования.

1. Впервые изучено явление восстановления формы сферических сегментов из сплавов никелида титана, возникающее вследствие потери устойчивости на этапе обратного МП. Выполнены измерения эффекта памяти формы сферических сегментов в режиме многократно повторяющихся циклов. Экспериментально доказано, что термоциклирование сферических сегментов через интервал МП сопровождается постепенным накоплением необратимой деформации на этапе нагрева. Следствием этого является незамкнутость термодформационного гистерезиса. Темп накопления недовозврата формы и связанная с этим термоциклическая долговечность зависят от геометрических размеров сегментов, физико-механических свойств сплава, типа мартенситной реакции и вида термомеханической обработки.

2. Экспериментально установлено влияние термомеханической обработки на стабилизацию структуры и свойства сферических сегментов. Разработан способ термомеханической обработки сферических сегментов, приводящий к увеличению максимального уровня реактивных напряжений, возникающего в сегментах при генерации напряжений на этапе обратного МП, а также снижению величины остаточной пластической деформации. Исследование влияния термообработки на механические и функциональные свойства проводилось на трех типах сплавов $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$, $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ и $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$. Показано, что механические свойства достигают максимального значения после предварительной прокатки и задания формы при отжиге сферических сегментов в заземленном состоянии при температуре $500^{\circ}C$ в течении 30 минут — для сплавов $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$, $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$ и отжиге при $500^{\circ}C$ в течении 30 минут + закалка от $850^{\circ}C$ 15 мин в воду — для сплава $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$.

3. Исследована стабильность функционально-механических свойств сферических сегментов в различных условиях эксплуатации. Сферический сегмент, одновременно выполняющий функции силового и термочувствительного элемента, после срабатывания будет находиться в напряженном состоянии вследствие изменения температуры и давления рабочей среды, которые могут оказывать существенное влияние на структурное состояние сплава, уровень реактивных напряжений, генерируемых в материале сегмента, и температуру срабатывания. Проведены систематические исследования стабильности функциональных свойств сферических сегментов в зависимости от длительности выдержки в двух термостатирующих камерах с температурами $(18 \pm 2^{\circ}C)$, $(-9 \pm 2^{\circ}C)$ в свободном состоянии (незаземленном) по типу хранения.

Практическая значимость работы. Результаты исследований показывают, что механизм или конструкция с исполнительным органом из сплава с ЭПФ в виде сферического сегмента обеспечивает короткое по времени срабатывание сегмента при его нагреве. Резкая потеря устойчивости сегмента на практике может использоваться многократно, например, в датчиках реле, терморегуляторах, термовыключателях, запорных клапанах и др. При этом,

изменяя геометрические параметры сегментов, можно добиться срабатывания при определенной температуре потери устойчивости ($T_{пу}$).

Проведенные систематические исследования позволили выдать рекомендации для проектирования различного типа регулирующих и исполнительных устройств и механизмов.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях: Международная конференция SMST-97 (Калифорния, 1997); Международный семинар «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева» (Новгород, 1997); II Международный семинар NDTCS-98 (Санкт-Петербург, 1998); III Международный семинар NDTCS-99 (Санкт-Петербург, 1999); III Международный семинар «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева (Старая Русса, 1999); IV Международный семинар «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева (Старая Русса, 2000); XXXVII Международный семинар «Актуальные проблемы прочности» (Киев, 2001); III Международная конференция «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (Оренбург, 2014); Международная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (Витебск, 2014); VII Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородный структур», ПРОСТ-2014 (Москва, 2014); Восьмая Международная конференция ФППК-2014 «Фазовые превращения и прочность кристаллов» памяти академика Г.В.Курдюмова (Черноголовка, 2014); Шестая Международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», посвященная 90-летию со дня рождения профессора Ю.А. Скакова, (Москва, 2015); XIX Международная конференция «Физика прочности и пластичности материалов», (Самара, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 37 работ, из них 10 – в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 117 страниц, включая 57 рисунков, 1 таблицу, 107 наименований библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, представлена характеристика объекта исследования, показана научная новизна и практическая ценность, представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературных данных, посвященный анализу функционально-механических свойств сплавов с ЭПФ.

Проанализированы данные по влиянию термической и термомеханической обработок (ТМО) на фазовые превращения, структуру, функциональные свойства сплавов никелида титана.

Рассмотрены факторы, влияющие на кинетику генерации и релаксации реактивных напряжений. Показано, что уровень генерируемых напряжений определяется степенью предварительной деформации, жесткостью противодействия, прочностными характеристиками сплава.

Исследованию функционально-механических свойств сплавов с ЭПФ посвящены работы И.Н. Андропова, С.П. Беляева, А.Е. Волкова, А.М. Глезера, В.Н. Гришкова, В.Э. Гюнтера, М.Е. Еварда, В.И. Зельдовича, С.Л. Кузьмина, В.А. Лихачева, А.И. Лоткова, В.Г. Малинина, Г.А. Малыгина, А.А. Мовчана, С.Д. Прокошкина, В.Г. Пушина, А.И. Разова, В.Н. Хачина, В.Г. Шипши и др. В данных работах накоплен богатейший материал по вопросам ЭПФ, псевдоупругости и пластичности превращения сплавов с ЭПФ и их механическом поведении. Однако возникает проблема управления функционально-механическими свойствами активных элементов из сплавов никелида титана в связи с расширением сферы применения сплавов с ЭПФ в технике и медицине.

На основе выявленного, в рамках анализа литературных данных, современного состояния проблемы, сформулирована цель и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе подробно описаны материалы и методики исследования.

Для изготовления объектов исследования в виде сферических сегментов использовались сплавы TiNi трех составов: $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$, $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ и $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$. Выбор трех типов сплавов, различающихся по составу и свойствам, был основан на расширении представлений механического поведения и возможности управления физико-механическими и функциональными свойствами. Сплавы $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ и $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$ характеризуются мартенситным переходом при охлаждении $B2 \rightarrow B2+B19' \rightarrow B19'$. При нагреве последовательность превращений осуществляется в обратном порядке. В сплаве с содержанием никеля 50,3ат.% при охлаждении наблюдается последовательность перехода $B2 \rightarrow R \rightarrow R+B19' \rightarrow B19'$, а при нагреве последовательность превращений уже иная: $B19' \rightarrow B2$.

Для определения температур МП данных сплавов использовалась схема четырехточечного нагружения, обеспечивающая чистый изгиб на среднем участке исследуемого образца. Кривые термомеханического гистерезиса записывались на компьютере по данным одновременного изменения температуры и стрелы прогиба образца при заданной нагрузке. Гистерезисы мартенситных превращений сплавов приведены на рисунке 1.

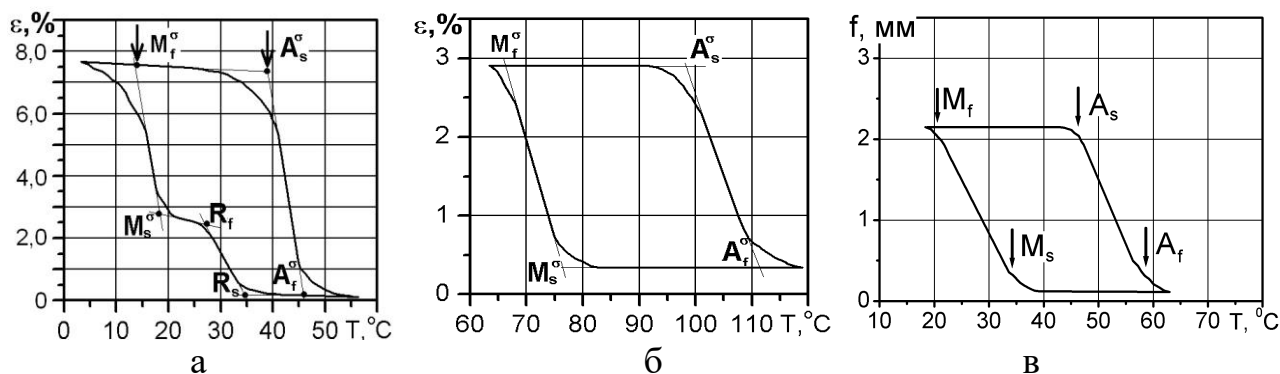


Рисунок 1 — Гистерезисы мартенситного превращения сплавов после отжига при температуре 500°C в течение 30 мин: а - $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$; б - $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$; в - $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$

Кривые гистерезиса превращения исследуемых сплавов, в соответствии с рисунком 1, показывают, что сплавы $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$ и $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$ (а, в) характеризуются узким гистерезисом, тогда как сплав, обогащенный титаном $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ (б), имеет достаточно широкий гистерезис.

Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии свидетельствуют о более низком уровне температур МП, в среднем на 17°C от данных термомеханического гистерезиса, в соответствии с рисунком 2. Такое различие в значениях температур МП обусловлено уровнем приложенного напряжения. С увеличением значения напряжения гистерезис МП смещается в область повышенных температур.

Исследование фазового состава и типа мартенситной реакции материалов проводилось с использованием рентгеновского анализа. Рентгеноструктурные исследования выполнены на рентгеновском дифрактометре “ДРОН-2”. Установлены кинетические и кристаллографические особенности образующихся фаз. Показано, что строение TiNi сплавов зависит от состава и

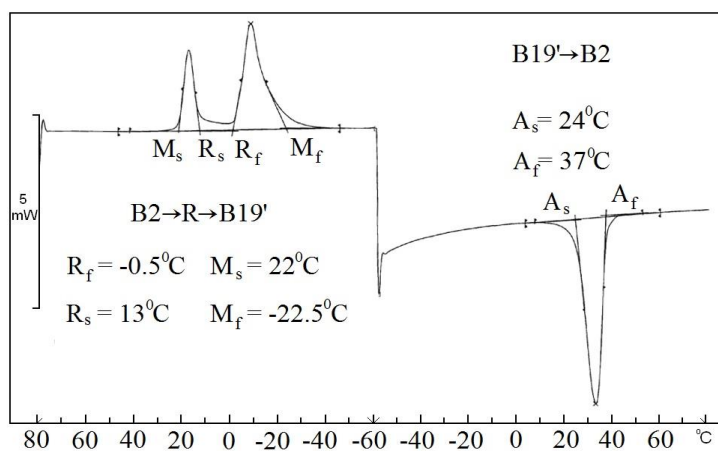


Рисунок 2 – Кривая DSC сплава $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$ после отжига при температуре 500°C в течение 30 мин

предварительной обработки. Изменение структурного состояния сплава за счет изменения концентрации компонентов или термической и пластической обработки влияет на кинетику мартенситных реакций, характеристические температуры, форму полной гистерезисной петли.

На рисунке 3 представлены профили дифракционных линий исследуемых сплавов.

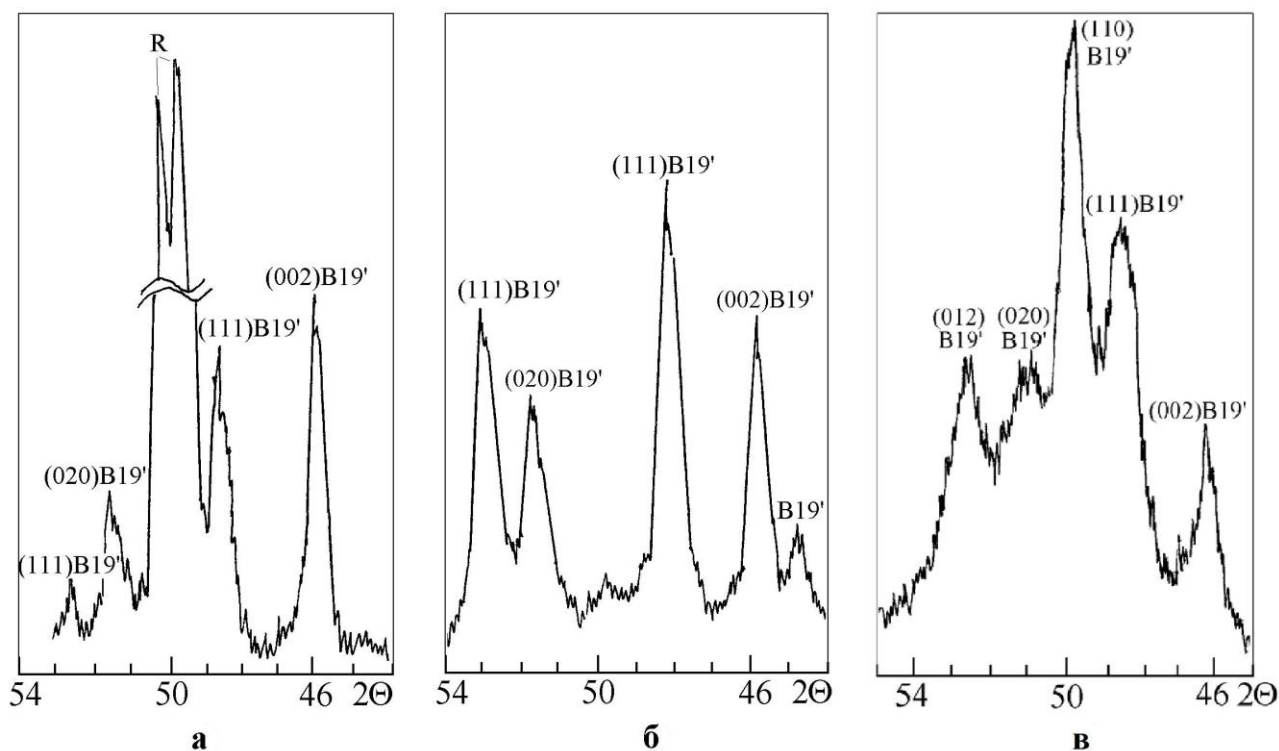


Рисунок 3 – Дифрактограммы сплавов:
 а — $\text{Ti}_{49,7}\text{Ni}_{50,3}$; б — $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$; в — $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{46}\text{Cu}_4$
 после отжига при температуре 500°C в течение 30 мин

Данные рисунка 3 свидетельствуют о том, что в сплавах $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$ и $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{46}\text{Cu}_4$ прямое МП завершается образованием однородной структуры мартенсита $\text{B}19'$. В то время как в сплаве $\text{Ti}_{49,7}\text{Ni}_{50,3}$ появляются максимумы интенсивности, соответствующие промежуточной фазе R-мартенсита с ромбоэдрической решеткой наряду с мартенситными фазами $\text{B}19'$.

На практике использование сплавов с ЭПФ определяется уровнем их функционально-механических свойств: температурами МП, величиной ЭПФ, механическими свойствами. Указанные характеристики являются структурно-чувствительными и зависят от режима предварительной термомеханической обработки сплава.

Были выбрано три режима термообработки прокатанных образцов из сплавов никелида титана трех составов:

- отжиг в течение 30 мин при 500°C ;
- отжиг в течение 1,5 часа при 420°C ;
- закалка в течение 15 мин при 820°C , охлаждение в воду.

Механические свойства после прокатки и различных видов термической обработки определялись на разрывных машинах FPZ-10/1 (Германия) и P-0,5.

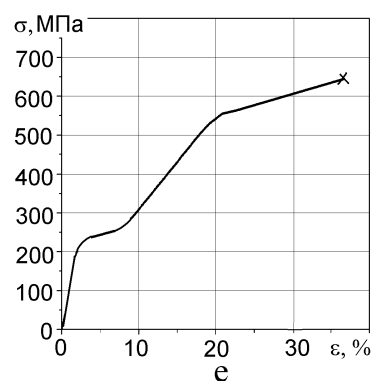
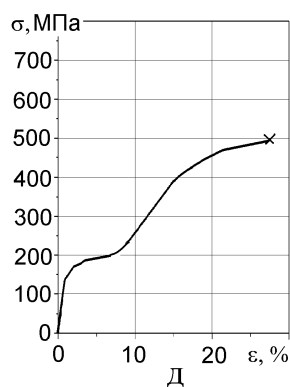
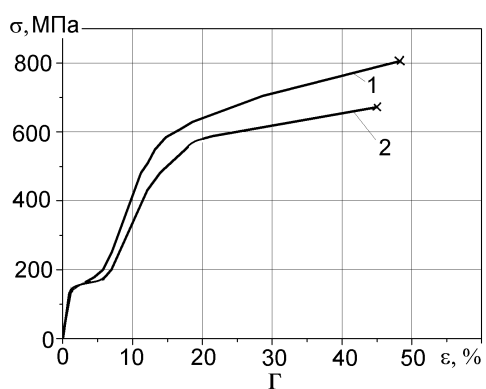
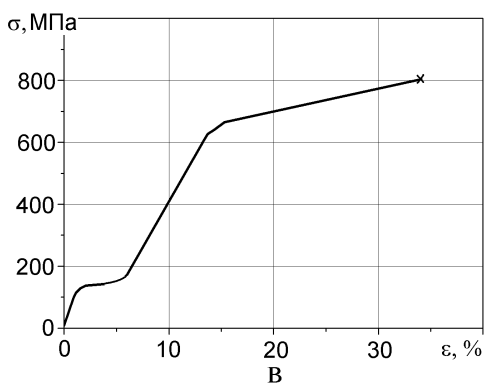
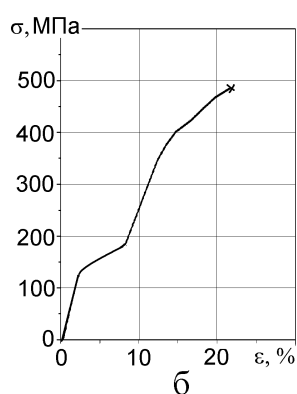
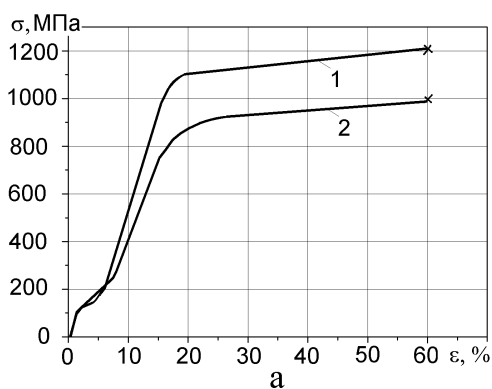


Рисунок 4 – Сплав $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$:

а — 1- отжиг при $500^{\circ}C$ в течение, 30 мин;

2 – отжиг при $420^{\circ}C$ в течение 1,5ч;

б — закалка в течение 15 мин при $820^{\circ}C$ охлаждение в воду.

Сплав $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$:

в —отжиг при $500^{\circ}C$ в течение 30 мин.

Сплав $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$:

г — 1 - отжиг при $500^{\circ}C$ в течение, 30 мин;

2 - отжиг при $420^{\circ}C$ в течение 1,5ч;

д — закалка в течение 15 мин при $820^{\circ}C$, охлаждение в воду;

е —отжиг при $500^{\circ}C$ в течение 30 мин

+ закалка в течение 15 мин при $820^{\circ}C$ охлаждение в воду

На рисунке 4 представлены диаграммы растяжения, полученные с помощью разрывной машины при скорости перемещения захватов 3 мм/мин. Изменение структуры влечет и изменение механических характеристик исследуемых сплавов, которые подтверждаются представленными диаграммы растяжения. Независимо от состава сплава наблюдается закономерность изменения свойств от вида термообработки. Предел текучести сплавов никелида титана после отжигов при 500 и 420°С не меняется, закалка приводит к его увеличению, однако предел прочности имеет максимальное значение после отжига при 500°С в течение 30 мин. Особенностью сплава $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ является то, что после такой термообработки работоспособность этого сплава мала, дополнительная закалка от 820°С в воду стабилизирует его свойства. Такой вид термической обработки существенно сужал гистерезис МП, повышая механические свойства и обеспечивая гарантированное срабатывание сферических сегментов. Диаграммы растяжения исследуемых сплавов согласуются с данными H_u и свидетельствуют о достаточно высоких свойствах сплава, обогащенного никелем. Прочностные свойства сплавов $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ и $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$ значительно ниже по сравнению с $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$.

Отмечены особенности изготовления сферических сегментов с заданными геометрическими параметрами. Сферическая поверхность круглой пластинки формировалась с помощью пресс-формы, в которой деформировалась по заданному радиусу. Затем жестко заземлялась и отжигалась при выбранной температуре.

После задания формы и памяти круглая пластинка приобретает конфигурацию сферического сегмента со следующими геометрическими параметрами, в соответствии с рисунком 5.

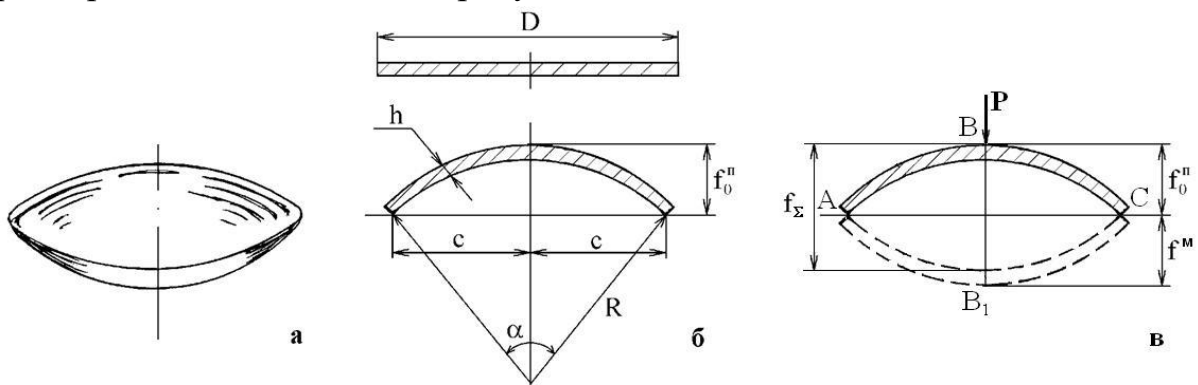


Рисунок 5 – Схематическое изображение сегмента.

а) общий вид сферического сегмента, б) геометрические параметры, в) схема прогиба в мартенситном состоянии: R — радиус кривизны; c — радиус в плане; α — угол охвата; f_0^n — высота подъема после задания формы; f^m — высота подъема, создаваемая путем прогиба в мартенсите; f_Σ — суммарный (общий) прогиб (зеркально по отношению к исходному); D — диаметр круглого диска; h — толщина сегмента

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований функционально-механических свойств сферических сегментов.

Функционально-механические свойства сплавов с памятью формы в значительной степени определяются предшествующей пластичной и термической обработкой. Большую роль играет текстурообразование или ориентированные микронапряжения и другие кристаллографические изменения в структуре сплавов при прокатке и различных видах термообработки. Сформированная структура на предшествующих операциях подготовки объектов исследования отражается и на механических свойствах.

Обнаружен скачкообразный характер термоупругой деформации памяти формы сферических сегментов из сплавов никелида титана. Данное явление обусловлено потерей устойчивости сегмента в фазовом переходе мартенсит \rightarrow аустенит. Температура, при которой сегмент теряет устойчивость ($T_{пу}$) и прощелкивает к исходной форме, находится вблизи температуры A_f — окончания обратного МП. Показано, что если сферический сегмент деформировать (прогнуть) в мартенсите зеркально исходной форме, то при нагреве до аустенитного состояния произойдет восстановление формы сегмента скачком. А при наличии препятствия на пути возврата формы – с ударом о препятствие. Описанное явление использовалось при создании запорных клапанов-отсекателей, в которых сферический сегмент при заданной температуре срабатывает скачком, закрывая проходное отверстие в клапане.

Экспериментально установлено, что количественная оценка явления потери устойчивости сферических сегментов реализуется при строго определенном соотношении параметров сегмент (D , h , R). Опытным путем были найдены соотношения D/R и h/R . Показано, что всегда есть нижняя и верхняя размерные границы, при которых явление потери устойчивости не наблюдается. Эффект (выраженный силой удара) всегда реализуется при условии потери устойчивости. Однако у нижней границы удары слабые и даже возникают условия плавного восстановления формы сегмента. Приближаясь к верхней границе, генерируемые напряжения усиливаются и при определенном соотношении размеров сегмента достигают максимального значения, выше которого сферическому сегменту не хватает усилий для восстановления заданной формы при нагреве.

Исследования выполнялись на сферических сегментах диаметром 17 мм из сплава $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$, показывающих наибольшие силовые характеристики по сравнению со сплавами $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ и $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$. Для оценки эффективности работоспособности сферических сегментов выбрали два параметра, характеризующие развивающиеся в материале сегмента реактивные напряжения: высота отскока сферического сегмента ($H_{отс}$) от поверхности, нагретой до температуры выше A_f , и сила удара ($P_{уд}$) о препятствующее тело в момент потери устойчивости сегмента на этапе обратного МП.

Выполненные многочисленные испытания сегментов по определению высоты отскока и силы удара позволили получить закономерную взаимосвязь силовых параметров $H_{отс}$ и $P_{уд}$ (рисунок 6). Высота отскока позволяет косвенно оценить силовой импульс, возникающий в сегменте в момент потери устойчивости. Такой подход не требует трудоемкой работы по определению силы удара с помощью разрывной машины.

Независимо от напряженного состояния, возникающего в сегменте, температуры начала и окончания интенсивного нарастания деформации при нагревании A_s^σ и A_f^σ не совпадают с соответствующими температурами A_s и A_f . Обычно A_s близка к A_s^σ , а A_f^σ значительно (до 10-15 градусов) превышает A_f . Температурный интервал формовосстановления сферических сегментов оказывается всегда шире температурного интервала фазовых превращений. Из рисунка 7 следует, что отскоки сегмента на значительную высоту (300-360 см) реализуются при $T_{пу}$ много выше A_f . И чем больше напряжения сконцентрированы по контуру сегмента, тем сильнее это отклонение.

Полученный результат представляется чрезвычайно важным с практической точки зрения, а рассматриваемый способ оценки генерируемых в материале сил по высоте отскока может успешно использоваться на этапе оптимизации геометрических параметров сферических сегментов.

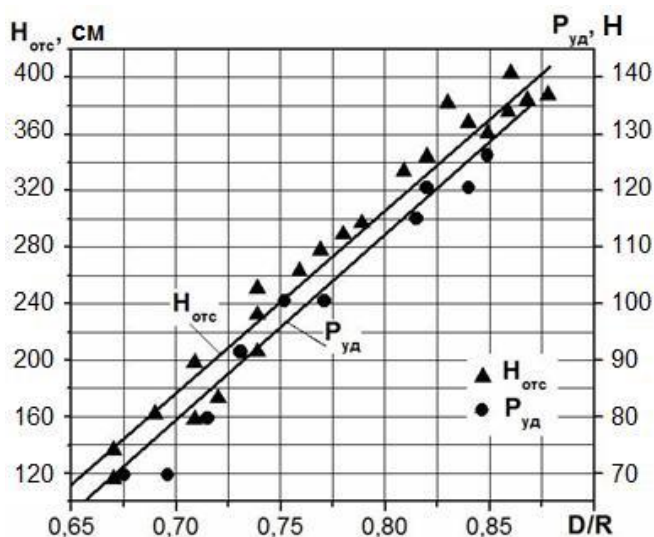


Рисунок 6 – Зависимость высоты отскока ($H_{отс}$) и силы удара ($P_{уд}$) сферических сегментов от соотношения D/R

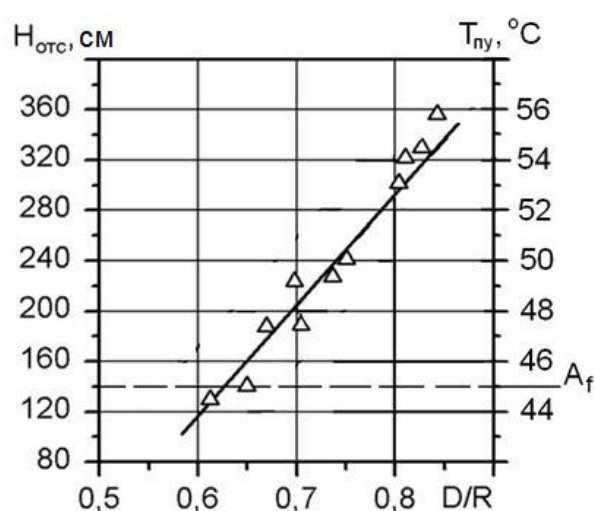


Рисунок 7 – Зависимость высоты отскока сферических сегментов $\varnothing 17$ мм от поверхности нагретой выше температуры A_f . Сплав $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$

Четвертая глава посвящена результатам исследований изменения функционально-механических свойств сферических сегментов в режиме многократно повторяющихся циклов через интервал МП. Исследования формоизменения сферических сегментов при теплосменах проводились в на специально созданной для этих целей шестипозиционной автоматизированной установке непрерывного действия. Одновременно на установке могут исследоваться шесть сегментов одинаковой геометрии. Прогиб в мартенситном состоянии всегда осуществляется на заданную стрелу прогиба f_0^M , которая обеспечивается наладкой. Упругая деформация, возникающая при прогибе сегмента, не учитывалась, поскольку она не изменялась в течение длительного циклирования (более $6 \cdot 10^4$ термоциклов).

Термоциклирование, как правило, завершалось, когда образец плавно восстанавливал форму, что свидетельствовало о низких реактивных напряжениях в сегменте. Об этом свидетельствовала высота отскока сегмента ($H_{отс} < 100$ мм) от поверхности, нагретой до температуры выше A_f .

Выявлен ряд факторов, безусловно, инициирующих скачок деформации. Известно, что вблизи температуры A_s^σ решетка мартенсита приобретает неустойчивость, в результате чего появляются химические и механические силы возврата. Одновременно с этим в материале пластины генерируют реактивные усилия, действующие в поперечном направлении. Под влиянием этих сил в области контура круглой пластины образуется сжатая зона, которая и является очагом потери устойчивости. Надо также учесть, что если высокотемпературная псевдоупругость наиболее отчетливо выражена вблизи температуры A_f^σ , то потеря устойчивости, возможно, связана с проявлением и этого эффекта, так как всегда выполняется условие $A_s^\sigma < T_{пy} < A_f^\sigma$.

Опыты показали, что термоциклирование сферических сегментов через интервал МП с реализацией эффекта потери устойчивости сопровождается постепенным накоплением необратимой деформации на этапе нагрева. Следствием этого является незамкнутость термодформационного гистерезиса и смещение температур потери устойчивости. Однако темп накопления недовозврата формы и связанная с этим термоциклическая долговечность зависит от геометрических размеров сегментов, физико-механических свойств сплава, типа мартенситной реакции и вида термомеханической обработки.

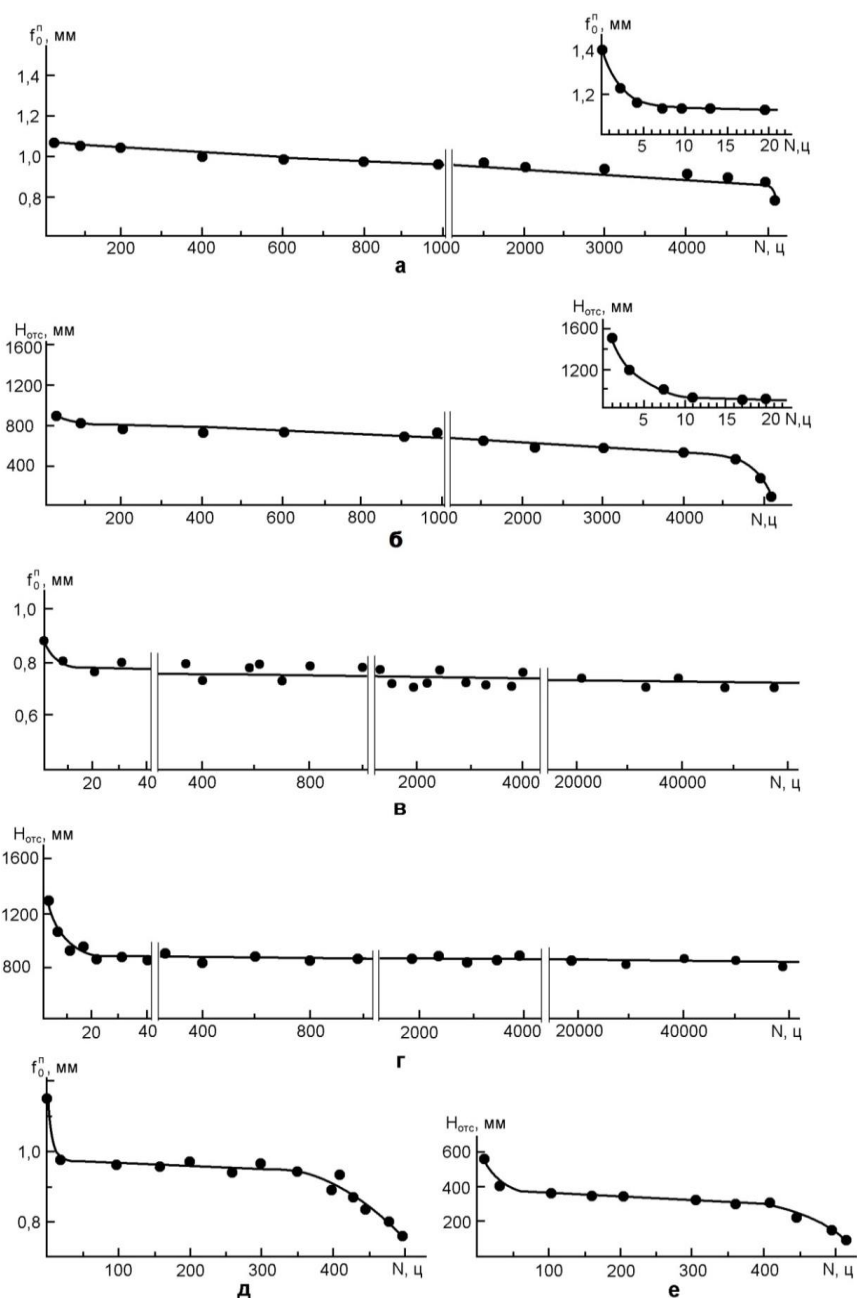


Рисунок 8 – Изменение стрелы подъема (а, в, д) и высоты отскока (б, г, е) от числа теплосмен сегментов из сплавов TiNi.

а, б — $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$; в, г, — $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$; д, е — $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$

Приведенные на рисунке 8 кривые позволяют полагать о вполне определенных закономерностях формоизменения сферических сегментов в процессе термоциклирования.

Существенная разница в поведении сплавов TiNi и TiNiCu в неизотермических условиях, вероятно, обусловлена теми же причинами, что и ускоренная ползучесть металлов при теплосменах. Один из факторов, приводящих к этим эффектам, — микронапряжения различной природы, которые вызывают развитие необратимой пластической деформации. По-видимому, в сплаве TiNiCu величина таких напряжений гораздо выше, что может быть связано с наличием в сплаве дисперсных включений многих фаз.

Наилучшие и стабильные характеристики памяти формы сплава $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$ связаны с совершенными термоупругими реакциями, в которых МП не сопровождается генерацией дефектов решетки, а значит, не вызывают необратимой деформации.

Работоспособность сферических сегментов хорошо характеризует величина недовозврата формы ($f_{нв}/f_0^n$).

На рисунке 9 приведены зависимости изменения значений $f_{нв}/f_0^n$ от числа термоциклов. Видно, что интенсивное изменение параметров происходит на первой стадии (10-12 циклов) – стадии неустановившегося формоизменения, где сферические сегменты показывают более высокие силовые характеристики. На второй стадии формоизменение сегментов стабилизируется. В этом случае при нагревании практически всегда наблюдается полный возврат деформации. При установившемся формоизменении стабилизируются также силовые характеристики ($H_{отс}$, $P_{уд}$). Такой характер изменения деформации может быть связан, с текстурированием материала, т.е. с образованием и преимущественным ростом только тех его кристаллографических вариантов, которые обеспечивают наибольшее (наименьшее) формоизменение материала. В процессе термоциклирования происходит избирательное наследование дефектов кристаллической решетки, что также приводит к увеличению эффекта памяти формы. Стабилизация эффекта памяти формы после 10-20 циклов свидетельствует о том, что указанные процессы, вызывающие вначале рост недовозврата формы, также стабилизировались. Различие в характере накопления необратимой деформации связывается лишь с устойчивостью структуры сплава, формируемой режимами пластической и термической обработки.

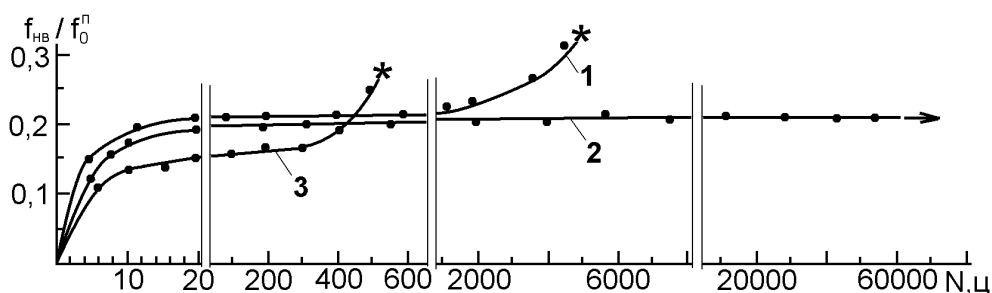


Рисунок 9 – Зависимость изменения степени недовозврата формы сегментов в процессе термоциклирования через интервал МП, из никелида титана трех составов.

1 - $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$; 2 - $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$; 3 - $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$. * - восстановление формы без скачка деформации; → - продолжение циклирования

При значениях $f_{нв}/f_0^n = 0,3 \div 0,35$ скачки деформации сегментов из сплавов $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ и $Ti_{50}Ni_{46}Cu_4$ становятся очень слабыми либо происходит плавное восстановление формы.

В тех случаях, если на этапе прямого мартенситного превращения образуется R-фаза по реакции $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ (сплав $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$), то сегменты

отличаются высокой термоциклической долговечностью. При этом благодаря R-фазе потеря устойчивости проявляется достаточно мощным скачком деформации и реализуется длительное время (более 10^4 термоциклов). При отношении $f_{\text{HV}}/f_0^{\text{II}} \geq 0,35$ сегментов из сплава $\text{Ti}_{49,7}\text{Ni}_{50,3}$ этот эффект становится слабым.

На рисунке 10 представлены результаты рентгеноструктурных исследований образцов сплава $\text{Ti}_{49,7}\text{Ni}_{50,3}$, снятые в режиме многократно повторяющихся циклов через интервал МП.

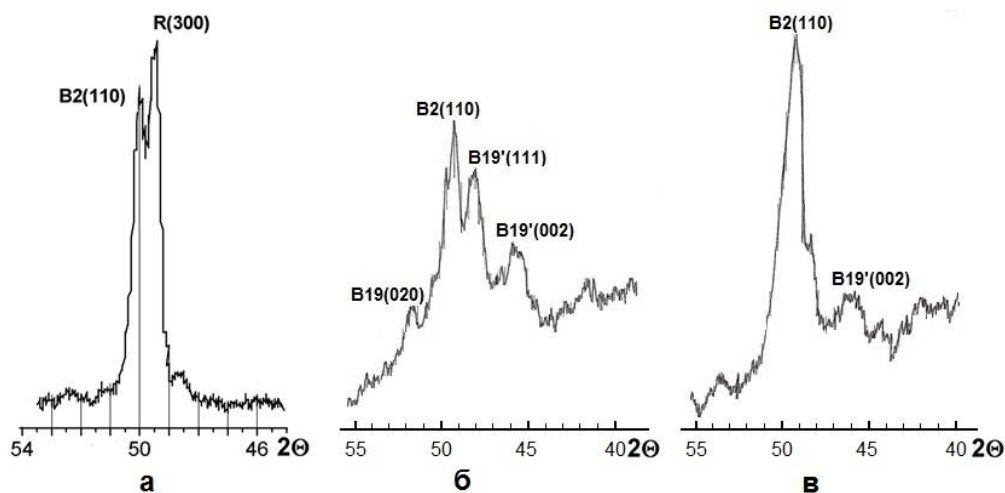


Рисунок 10 — Дифрактограммы сплава $\text{Ti}_{49,7}\text{Ni}_{50,3}$ после отжига при 500°C , 30 мин. при длительном циклировании через интервал мартенситных превращений:

а – исходная; б – 800 циклов; в – $5 \cdot 10^4$ циклов.

Из анализа данных спектров следует, что сплав при комнатной температуре находится в аустенитном состоянии. После отжига 500°C сплав имеет структуру B2-аустенита и ромбоэдрическую структуру R, в соответствии с рисунком 11а. При термоциклировании под влиянием внутренних напряжений в сплаве происходит МП $\text{B2} \rightarrow \text{B19}'$, в соответствии с рисунком 11б. Изменение соотношения интенсивности пиков указывает на прошедшие деформационные текстурные процессы. Режим многократно повторяющихся циклов, в соответствии с рисунком 11в, приводит к восстановлению B2-аустенита.

Таким образом, изложенные данные по рассмотренным термомеханическим характеристикам могут служить достаточным основанием для использования сферических сегментов из сплавов с ЭПФ в долговременно действующих устройствах. Проведенные систематические исследования позволили выдать рекомендации для проектирования различного типа регулирующих и исполнительных устройств и механизмов.

В 1996 году на международной ярмарке в Лейпциге демонстрировался термовыключатель на основе сферического сегмента. Получен патент на изобретение №2171937 «Термоклапан».

Это позволяет говорить о перспективности использования в практике сферических сегментов из сплавов с ЭПФ в качестве рабочих элементов.

В заключении сформулированы выводы и основные результаты работы:

1. Установлено явление скачкообразного восстановления формы сферических сегментов с высоким уровнем генерируемых напряжений на этапе обратного МП в связи с потерей устойчивости для сплавов TiNi трех составов.
2. В результате многочисленных экспериментальных данных исследования сферических сегментов из сплавов $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$, $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$, имеющих различные геометрические параметры, обнаружена зависимость силовых характеристик сегментов от их геометрических размеров. Определены соотношения связывающих между собой оптимальные геометрические параметры сегментов, обеспечивающие высокие реактивные усилия.
3. Выявлены закономерности генерации и релаксации напряжений на этапе обратного МП никелида титана трех составов. Показано, что независимо от состава сплава при нагревании сдеформированного и заневоленного сегмента в нем возникают реактивные напряжения. Установлено, что уровень реактивных напряжений определяется, в первую очередь, величиной обратимой деформации и прочностными характеристиками материала.
4. Разработана методика исследования функционально-механических свойств сферических сегментов в режиме многократно повторяющихся циклов через интервал МП.
5. На основе анализа экспериментальных данных выявлены закономерности формоизменения сегментов при длительном термоциклировании. При исследовании никелида титана трех составов было установлено, что изменение кривых термоциклической долговечности происходит в три стадии. Показано, что эти стадии можно сопоставить с этапами изменения кривой изотермической ползучести. Первая стадия характеризуется монотонным резким формоизменением сегментов (стадия неустановившегося формоизменения). За ней следует стадия, характеризующаяся линейной зависимостью, в течение которой проявляется медленное изменение характеристик. Эту стадию можно назвать стадией установившегося формоизменения. Третья стадия характеризуется непрерывно возрастающим формоизменением и по этой причине можно назвать стадией ускоренного формоизменения, при этом генерируемые напряжения становятся очень слабыми либо сегмент разрушается. Вторая стадия как раз и имеет практическое значение для эксплуатации устройств с ЭПФ. Установлено, что кинетика указанного процесса зависит от состава сплава. Показано, что сплавы с R-фазой являются наиболее перспективными материалами для изготовления сферических сегментов.
6. Проведенные систематические исследования позволили разработать рекомендации для проектирования различного типа регулирующих и исполнительных устройств и механизмов. Получен патент на изобретение — термодвигатель на основе сферического сегмента (№ 2171937 от 10.08.2001 г.).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Малухина О.А. Взрывной характер памяти формы в сферических сегментах из никелида титана / О.А. Малухина, М.А. Хусаинов // Вестник НовГУ. Серия. Физико-математические науки. – 2014. – № 80. – С. 82.
2. Малухина О.А. Влияние температуры нагрева сферических сегментов из сплавов TiNi на эффект памяти формы / О.А. Малухина, М.А. Хусаинов, В.А. Андреев // Вестник НовГУ. Серия. Технические науки. – 2015. – № 8(91). – С. 89-90.
3. Малухина О.А. Работоспособность сферических сегментов из сплавов с эффектом памяти формы при термомеханическом циклировании через интервал мартенситных превращений / О.А. Малухина, Д.А. Филиппов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 7(61). – Ч. 3. – С. 50-53.
4. Хусаинов М.А. Оптимизация геометрических параметров сферических сегментов из сплавов никелида титана с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, С.А. Попов, О.А. Малухина // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, вып. 8. – С. 46-52.
5. Хусаинов М.А. Влияние импульсного нагрева на структуру и функциональные свойства никелида титана с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина, В.А. Андреев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 2(716). – С. 22-27
6. Малухина О.А. Усталость сферических сегментов с эффектом памяти формы / О.А. Малухина, М.А. Хусаинов // Вестник НовГУ. Серия. Физико-математические науки. – 2013. – № 75, т. 2. – С.103-104.
7. Работоспособность сферических сегментов после вылеживания в различных климатических условиях / М.А. Хусаинов, А.Б. Бондарев, Н.В. Маркина, О.А. Малухина // Вестник НовГУ. Серия. Физико-математические науки. – 2013. – № 73, т. 2. – С.120-126.
8. Хусаинов М.А. Кинетика изменения функциональных свойств никелида титана с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина, Н.В. Петров // Вестник НовГУ. Серия. Технические науки. – 2014. – № 81. – С.73-75.
9. Хусаинов М.А. Роль пластической деформации в стабилизации структуры и функциональных свойств никелида титана / М.А. Хусаинов, Н.В. Петров, О.А. Малухина // Вестник НовГУ. Серия. Технические науки. – 2013. – № 75, т. 1. – С.46-48.
10. Хусаинов М.А. Фазовые переходы в сплавах никелида титана с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина, В.А. Андреев // Вестник НовГУ. Серия. Физико-математические науки. – 2015. – № 3(86). – Ч. II. – С.81-84.

В других изданиях

11. Волнянская О.Ю. Влияние пластической деформации прокаткой "вхолостую" с промежуточными отжигами на свойства ЭПФ сплава Ti-50,4 ат.% Ni / О.Ю. Волнянская, О.А. Малухина // Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий : межвуз. сб. / Сев.-Зап. гос. заоч. техн. ун-т. – СПб., 2005. – Вып. 11. – С. 35-40.
12. Волнянская О.Ю. Влияние температуры последеформационного отжига на эффект стабилизации структурного состояния сплавов на основе TiNi / О.Ю. Волнянская, О.А. Малухина // Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий : межвуз. сб. / Сев.-Зап. гос. заоч. техн. ун-т. – СПб., 2005. – Вып. 11. – С. 28-34.
13. Investigation of resistance of alloy spherical sheaths with shape memory effect (SME) / M.A. Khusainov, O.A. Malukhina, V.N. Belyakov, O.V. Letenkov // Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST-97), USA, California, Asi-lomar Conference Centre Pacific Grove, 2-6 March 1997. – USA, California, 1997. – P. 215-219.
14. Малухина О.А. Взрывной характер памяти формы в сферических сегментах из никелида титана / О.А. Малухина, М.А. Хусаинов // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов : сб. докл. III Междунар. конф., г. Оренбург, 3-5 февр. 2014 г. / [под общ. ред. В. И. Грызунова]. – Оренбург, 2014. – С. 326-328.
15. Малухина О.А. Влияние радиуса кривизны на эффект прощелкивания сферических сегментов из никелида титана / О.А. Малухина, М.А. Хусаинов // Материалы докладов аспирантов, соискателей, студентов : XXI науч. конф. преп., асп. и студентов НовГУ, 14-19 апр. 2014 г. Ч. 1 / сост. Г. В. Волошина, Т. В. Прокофьева; Новгород. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2014. – С.112-113.
16. Малухина О. А. Влияние температуры и длительности вылеживания на функционально-механические свойства сферических сегментов / О.А. Малухина, В.Н. Беляков // Инструменты и технологии. – 2002. – № 5/6. – С. 53-56.
17. Малухина О.А. Исследование функциональных свойств сферических сегментов из сплавов с эффектом памяти формы при термомеханическом циклировании // Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий : межвуз. сб. / Сев.-Зап. гос. заоч. техн. ун-т. – СПб., 2003. – Вып. 8. – С. 144-151.
18. Малухина О.А. Стабильность и механические свойства сегментов из сплава TiNi-4at%Cu с эффектом памяти формы / О.А. Малухина, Д.А. Филиппов // Журнал передовых исследований в области технических наук. – 2017. – № 5. – С. 53-56.
19. Термоклапан: Пат. № 2171937 от 27.01.2002 г. / М.А. Хусаинов, Б.Я.

Тамбулатов, А.Г. Ларионов, О.А. Малухина . – Опубликовано 10.08.01. Бюл. № 11

20. Термомеханическое поведение сферических оболочек из сплавов с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина, В.Н. Беляков, О.В. Летенков // Вестник НовГУ. Серия. Естественные и технические науки. – 1997. – № 5. – С. 39-43.
21. Хусаинов М.А. Анализ устойчивости сферических сегментов с памятью формы / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Научные труды III Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 20-24 сент. 1999 г. / сост. В. Г. Малинин : в 2 т. – Великий Новгород, 1999. – Т. 2. – С. 185-189.
22. Хусаинов М.А. Влияние импульсного нагрева на структуру и функциональные свойства никелида титана с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, В.А. Андреев, О.А. Малухина // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов : сб. докл. III Междунар. конф., г. Оренбург, 3-5 февр. 2014 г. / [под общ. ред. В. И. Грызунова]. – Оренбург, 2014. – С.329-338.
23. Хусаинов М.А. Влияние пластической и термической обработки сплава ТН-1 на температуры мартенситных превращений / М.А. Хусаинов, О.Ю. Волнянская, О.А. Малухина // Научные труды IV Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 18-22 сент. 2000 г. / сост. В. Г. Малинин. – 2000. – Т. 2. – С. 244-248.
24. Хусаинов М.А. Влияние скорости нагрева на полноту восстановления формы сферических сегментов / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина, В.А. Андреев // Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов, посвященна 90-летию со дня рождения профессора Ю.А. Скакова : тезисы докл. Шестой Междунар. конф., Москва, 26-28 мая, 2015 г. / Нац. исслед. гос. ун-т МИСиС. – М., 2015. – С. 324.
25. Хусаинов М.А. Влияние термоциклирования на геометрические параметры и эффект хлопка сферических сегментов из материала с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Научный труды I Междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева и XXXIII семинара «Актуальные проблемы прочности», Старая Русса, 15-18 окт. 1997 г. / сост. В. Г. Малинин : в 2 т. – Новгород, 1997. – Т. 2, ч. 2. – С. 262-264.
26. Хусаинов М.А. Механика разрушения сферических сегментов из сплавов на основе никелида титана / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Научные труды IV Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 18-22 сент. 2000 г. / сост. В. Г. Малинин. – 2000. – Т. 2. – С. 239-243.
27. Хусаинов М.А. Моделирование механического поведения сферических сегментов из никелида титана с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, С.А. Попов, О.А. Малухина // Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы : материалы междунар. конф., Беларусь, Витебск, 26-30 мая 2014 г. / Витеб. гос. технол. ун-т, ЦИТ. – Витебск, 2014. – С. 98-100.

28. Хусаинов М.А. О взаимосвязи силовых характеристик с геометрическими параметрами выпуклых сегментов из сплавов TiNi / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Научные труды III Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 20-24 сентября 1999 г. / сост. В. Г. Малинин : в 2 т. – Великий Новгород, 1999. – Т. 2. – С. 199-203.
29. Хусаинов М.А. О взаимосвязи характерных диаграмм прогиба сферических сегментов с вероятностью реализации эффекта прощелкивания / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Актуальные проблемы прочности : тезисы докл. XXXVII Междунар. семинара, Украина, Киев, 3-5 июля 2001 г. / КГУ. – Киев, 2001. – С.407-408.
30. Хусаинов М.А. О влиянии геометрических параметров сферических сегментов на силу их удара при отогреве / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина, О.Ю. Волнянская // Научные труды IV Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 18-22 сент. 2000 г. / сост. В. Г. Малинин. – 2000. – Т. 2. – С. 236-238.
31. Khusainov M.A. The investigation of clicking effect of the shape memory alloys spherical shells. / М.А. Khusainov, О.А. Malukhina // II International Workshop on «New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Engineering» (NDTCS-98), Russia, St. Petersburg, 7-11 June 1998 year : Proceedings of SPAS. – St. Petersburg, 1998. – Vol. 2. – P. 55.
32. Khusainov M.A. Thermocycling influence on the clicking effect of the buckled segments from Ni-Ti alloys with the shape memory / М.А. Khusainov, О.А. Malukhina // III International Workshop on «New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Engineering» (NDTCS-99), Russia, St. Petersburg, 7-11 June 1999 year : Proceedings of SPAS. – St. Petersburg, 1999. – Vol. 3. – P. 18-19.
33. Хусаинов М.А. Термоциклическая долговечность выпуклых сегментов из сплава TiNi / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Научные труды III Междунар. семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева, Старая Русса, 20-24 сентября 1999 г. / сост. В. Г. Малинин : в 2 т. – Великий Новгород, 1999. – Т. 2. – С. 195-198.
34. Хусаинов М.А. Устойчивость и динамические характеристики сферического сегмента из сплава с памятью формы [Электронный ресурс] / М.А. Хусаинов О.А. Малухина // Ученые записки НовГУ : электронный журнал. – 1999. – № 1. – Режим доступа : <http://axis.novsu.ac.ru/uni/scpapers.nsf>.
35. Хусаинов М.А. Устойчивость сферических оболочек из сплава TiNi с ЭПФ / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Научные труды I Междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева и XXXIII семинара «Актуальные проблемы прочности», Старая Русса, 15-18 окт. 1997 г. / сост. В. Г. Малинин : в 2 т. – Новгород, 1997. – Т. 2, ч. 2. – С. 387-391.
36. Хусаинов М.А. Функционально-механические свойства выпуклых сегментов из сплавов TiNi с эффектом памяти формы / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Фазовые превращения и прочность кристаллов, посвящена 110-летию со дня рождения академика Г.В. Курдюмова : сб. тезисов Восьмой Междунар. конф.,

Черноголовка, 27-31 октября 2014 г. / РАН, Институт физики твердого тела. – Черноголовка, 2014. – С. 59.

37. Хусаинов М.А. Функциональные свойства сферических сегментов / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина, В.А. Андреев // Физика прочности и пластичности материалов : тезисы докладов XIX Междунар. конф., Самара, 8 -11 июня 2015 г. / Саратов. гос. технол. ун-т. – Самара, 2015. – С. 94.
38. Хусаинов М.А. Явление потери устойчивости сферических сегментов из сплавов никелида титана / М.А. Хусаинов, О.А. Малухина // Прочность неоднородных структур : сб. тезисов VII Евразийской науч.-практ. конф., Москва, 22-24 апреля 2014 г. / Нац. исслед. гос. ун-т МИСиС. – М., 2014. – С.19.

Научное издание

Малухина Ольга Андреевна

**Особенности формирования функционально-механических свойств
сферических сегментов из никелида титана с эффектом памяти формы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____. Формат 60×90/16

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № ____

Отпечатано в ЗАО «Новгородский технопарк»
173003, Великий Новгород, ул. Б.Санкт-Петербургская, 41
Тел. (8162)731-705