

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.789

МИЛЮКИНА
Светлана Николаевна

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ СПЛАВОВ TiNi С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ
И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТОК**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2015

Работа выполнена в УО «Витебский государственный технологический университет» и ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»

- Научный руководитель: **Рубаник Василий Васильевич**, доктор технических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, директор ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»
- Официальные оппоненты: **Томило Вячеслав Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, директор ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»;
- Сухоцкий Павел Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета
- Оппонирующая организация: Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Защита состоится «15» января 2016 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, ул. Б. Хмельницкого, 9, корп. 6, ауд. 419 б, телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» декабря 2015 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор

_____ Девойно О.Г.

© Милюкина С.Н., 2015
© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление конкретных изделий предполагает обработку полуфабрикатов из TiNi сплавов с целью задания требуемых функциональных свойств и памяти формы конструкции. В связи с трудностью получения полуфабриката заданного химического состава, обуславливающего рабочий диапазон температур, развиваемые усилия, восстанавливаемую деформацию и др., установление оптимального режима обработки с целью коррекции функциональных свойств представляет отдельную научно-исследовательскую задачу для каждой партии материала. Основная часть, проводимых в этой области исследований, направлена на разработку новых схем термомеханической обработки TiNi сплавов для улучшения их функциональных свойств: увеличение обратимой деформации, развиваемых усилий, повышение долговечности в условиях циклического воздействия и пр. Параллельно проводятся работы по поиску новых видов воздействия, в частности, ультразвуковых колебаний (УЗК) на термоупругие мартенситные превращения. Эти исследования начаты сравнительно недавно, и являются перспективным научным направлением.

Для задания памяти формы конструкции обычно используют длительную выдержку жёстко зафиксированной конструкции при температурах, превышающих 400 °С, что влечёт за собой помимо изменения всего комплекса функциональных свойств материала, в ряде случаев ухудшение свойств его поверхности и делает невозможным создание комбинированных конструкций, не выдерживающих таких высоких температур. Однако данных о конкретных режимах обработки для задания памяти формы при более низких температурах в литературных источниках недостаточно, и, следовательно, необходимо проведение дополнительных исследований, а также выявление возможности использования для этих целей ультразвуковых колебаний.

В связи с этим исследование влияния различных режимов термического и ультразвукового воздействий на задание памяти формы и функциональные характеристики TiNi сплавов с памятью формы (СПФ) с целью разработки технологии изготовления изделий из сплавов TiNi является актуальной задачей, как с научной точки зрения, так и с целью практического применения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Результаты диссертационной работы получены в рамках выполнения заданий Государственной программы прикладных научных исследований «Материалы в технике» по темам «Развитие методов и технологических основ процесса волочения и термомеханической обработки сплавов с памятью формы при ультразвуковом воздействии» (№ ГР 20064373, сроки выполнения 2006-2010 гг.) и «Разработка и исследование процессов получения и обработки интеллектуальных материалов с термоупругими фазовыми переходами» (№ ГР 20115350, сроки выполнения 2011-2013 гг.); Государственной программы ориентированный фундаментальных научных исследований «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» по теме «Исследование физики процесса переноса энергии при термоупругих фазовых переходах, инициированных мощным акустическим воздействием» (№ ГР 20064372, сроки выполнения 2006-2008 гг.); Государственной программы

научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» по теме «Разработка и исследование технологии задания формы материалам на основе никелида титана для получения изделий медицинского назначения» (№ ГР 20141199, сроки выполнения 2014-2015 гг.); проекта Министерства образования по теме «Исследование термомеханических свойств сплавов с эффектом памяти формы для использования их в исполнительных устройствах» (№ ГР 20132487, сроки выполнения 2013-2014 гг.); совместного проекта БРФФИ-РФФИ «Функционально-механические свойства термоактуатора на основе биметалла, содержащего сплав TiNi с памятью формы» (№ T10P-223, сроки выполнения 2010-2012 гг.), а также в процессе выполнения работ по гранту Министерства образования по теме «Исследование процесса задания термомеханических свойств никелида титана при помощи ультразвуковых колебаний» (№ ГР 20081467, сроки выполнения 2008 г.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка технологии изготовления изделий из сплавов TiNi с использованием термической и ультразвуковой обработки, обеспечивающей им повышенные функциональные свойства.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные задачи:

- на основе экспериментальных исследований установить зависимости запоминаемой деформации и характеристических температур от температуры и продолжительности термического воздействия;
- исследовать влияние ультразвукового воздействия на запоминаемую деформацию и функциональные свойства TiNi сплава и разработать новый низкотемпературный способ задания памяти формы посредством ультразвуковой обработки;
- изучить кинетику нагрева TiNi сплава в деформированном и заневоленном состоянии в процессе ультразвукового воздействия;
- предложить механизм низкотемпературного процесса задания памяти формы, устанавливающий связь между запоминаемой деформацией и температурой обработки материала;
- на основе результатов исследований разработать технологию изготовления изделий из сплавов TiNi с использованием термической и ультразвуковой обработки, получить опытные и экспериментальные образцы изделий с памятью формы и провести их технические испытания, разработать проекты Технических условий и Инструкции на производство.

Научная новизна

Экспериментально установлены зависимости запоминаемой деформации от температуры и продолжительности термической обработки, позволяющие осуществить выбор оптимального режима обработки материала при изготовлении изделия с памятью формы.

Исследована зависимость температуры напряженного TiNi сплава от интенсивности и продолжительности ультразвукового воздействия, позволившая определить температурный диапазон обратного фазового превращения и максимальную температуру нагрева материала в процессе ультразвуковой обработки. Показано,

что с увеличением интенсивности ультразвуковой обработки фазовый предел текучести в материале уменьшается, а температурный интервал формовосстановления увеличивается.

Установлена зависимость величины запоминаемой деформации от интенсивности ультразвукового воздействия. Разработан низкотемпературный способ задания памяти формы посредством ультразвуковой обработки, обеспечивающий задание памяти формы при температурах $A_k + 15$ °С.

Предложен механизм низкотемпературного процесса задания памяти формы, устанавливающий связь между запоминаемой деформацией и температурой обработки материала.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований влияния термической обработки на задание памяти формы и функциональные свойства сплавов Ti-50,8 ат.% Ni и Ti-50,4 ат.% Ni, позволившие установить зависимости запоминаемой деформации от температуры и продолжительности термического воздействия, определить оптимальные режимы термообработки, обеспечивающие требуемые функциональные характеристики, в зависимости от химического состава сплава и условий применения.

2. Обнаруженный эффект запоминания формы в результате ультразвукового воздействия на сплав TiNi в заневоленном состоянии и установленные экспериментально зависимости запоминаемой деформации от интенсивности и продолжительности ультразвуковой обработки, позволившие осуществить задание памяти формы конструкциям из сплавов TiNi при низкотемпературном воздействии только за счёт энергии ультразвуковых колебаний. Результаты экспериментальных исследований влияния ультразвукового воздействия на динамику формовосстановления и функциональные свойства TiNi сплавов, позволившие установить зависимости фазового предела текучести и температурного интервала формовосстановления от интенсивности ультразвуковой обработки.

3. Установленные экспериментально закономерности изменения температуры напряженного TiNi сплава от интенсивности и продолжительности ультразвукового воздействия, позволившие определить температурный интервал обратного фазового превращения и максимальную температуру нагрева материала в процессе ультразвуковой обработки, установить оптимальную продолжительность ультразвукового воздействия для задания памяти формы.

4. Механизм низкотемпературного процесса задания памяти формы, заключающийся в реализации обратного мартенситного превращения в деформированном и заневоленном материале и устанавливающий связь между запоминаемой деформацией и температурой обработки материала. Результаты теоретических и экспериментальных исследований интервала температур обратного мартенситного превращения в зависимости от величины приложенного напряжения в сплаве TiNi, подтверждающие предложенный механизм.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем. Автором лично проведены экспериментальные исследования по определению влияния различных

режимов термического и ультразвукового воздействий на задание памяти формы и функциональные свойства TiNi сплавов; проведено изучение кинетики нагрева напряженного материала в процессе ультразвукового воздействия и разработан низкотемпературный способ задания памяти формы посредством ультразвуковой обработки; проведены теоретические исследования и на основе структурно-аналитической теории прочности предложен механизм запоминания деформации при низкотемпературной обработке, устанавливающий связь между запоминаемой деформацией и температурой обработки материала; разработаны проект Технических условий на ортодонтические дуги, Инструкция на их производство и изготовлены опытные образцы сверхэластичных и термоактивируемых дуг; разработаны и изготовлены конструкции дилататоров цервикального канала и при его непосредственном участии проведены их испытания на удаленных органах.

Участие соавторов в совместных работах: В.В. Рубаник, как научный руководитель, оказывал практическую помощь и содействие на всех этапах выполнения настоящей работы; В.В. Клубович и В.В. Рубаник (мл.) принимали участие в выборе методик и в анализе отдельных результатов исследований; В.Г. Дородейко и А.Ю. Журавлев участвовали в обсуждении требований, предъявляемых к изделиям медицинского назначения. Остальные соавторы оказывали практическую помощь при проведении конкретных исследований.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих симпозиумах, конференциях и семинарах: IV и VI Международных конференциях «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, Россия, ФППК-2006, ФППК-2010); 7th European Symposium on Martensitic Transformations (Bochum, Germany, ESOMAT'06); European Congress on Advanced Materials and Processes (Nürnberg, Germany, EUROMAT 2007); European Materials Research Society (Warsaw, Poland, E-MRS Fall Meeting, 2007); 8-й международной конференции «Авангардные машиностроительные технологии» (Кранево, Болгария, 2008 г.); Международных симпозиумах «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, Беларусь, 2009, 2011, 2013, 2015 гг.); XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (Самара, Россия, 2009 г.); 46, 50 и 53-м Международных симпозиумах «Актуальные проблемы прочности», Витебск, Беларусь (2007, 2010, 2012 гг.); 9th European Symposium on Martensitic Transformations (Sankt-Peterburg, Russia, ESOMAT'12); The International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (Prague, Czech Republic, SMST'13); Международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (Витебск, Беларусь, ЭПФ-2014).

За научно-исследовательскую работу «Разработка технологии изготовления изделий медицинского назначения из материалов с эффектом памяти» получен диплом лауреата премии Витебского областного исполнительного комитета талантливым молодым учёным и специалистам (2008 г.). За доклад «Технология получения изделий из TiNi сплавов с эффектом памяти формы при тепловой и ультразвуковой обработке» получен диплом на Международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (2014 г.).

Поданы 2 заявки на получение патентов на изобретения: евразийского и Республики Беларусь.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 научных работах, в том числе: 1 коллективной монографии, 8 статьях в рецензируемых научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 6,7 авторских листа; 7 статьях в сборниках материалов и трудов научных конференций, 9 тезисах докладов конференций. Получен 1 патент Республики Беларусь на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 168 страниц, включая 81 рисунок, 12 таблиц, 4 приложения, библиографический список из 136 источников, в том числе 26 публикаций автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** приведено краткое описание функциональных свойств TiNi сплавов, проанализированы работы, посвященные влиянию на них термической и ультразвуковой обработок и практическому применению эффектов памяти формы. Показано, что весь спектр функциональных свойств проявляется при изменении содержания никеля в пределах всего одного процента (от 50,0 до 51,0 ат. % Ni). В связи с трудностью получения полуфабриката заданного химического состава, значительная часть исследований направлена на разработку новых способов обработки для коррекции и повышения их функциональных свойств. В то же время, в литературных источниках не обнаружены данные о конкретных режимах обработки для задания памяти формы при более низких температурах, также как и зависимости запоминаемой деформации от температуры и продолжительности термического воздействия, что затрудняет установление оптимального режима обработки материала. Анализ работ по влиянию ультразвука на СПФ показал, что проведенные исследования, главным образом, посвящены особенностям протекания мартенситных превращений в процессе ультразвукового воздействия, а использование ультразвуковой обработки с целью воздействия на функциональные свойства TiNi сплавов рассмотрено в немногочисленных работах, которые свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших исследований. Показано, что сплавы TiNi, вследствие своих уникальных термомеханических свойств, представляют реальный практический интерес при разработке различных изделий медицинского и технического назначения.

На основании анализа литературных источников, изложенного в первой главе, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена описанию используемых при проведении исследований материалов и оборудования, а также методик исследования и обработки экспериментальных данных. Объект исследований представляет собой проволочные

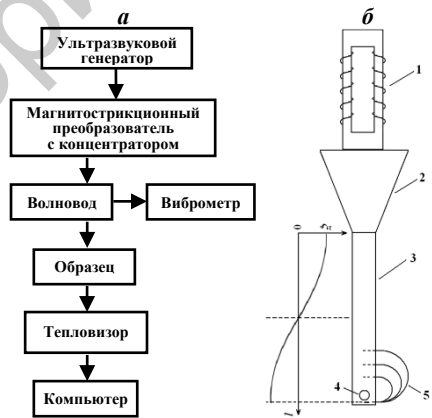
образцы из TiNi сплава двух составов: Ti-50,4 ат.% Ni и Ti-50,8 ат.% Ni различных диаметров от 0,3 до 0,65 мм, изготовленные в промышленном центре «МАТЭК-СПФ» (г. Москва) по стандартным заводским технологиям. Выбор указанных составов обусловлен целью и задачами работы: широким использованием для изготовления медицинских изделий сплава Ti-50,8 ат.% Ni, а в случае технического применения сплава Ti-50,4 ат.% Ni, — при комнатных температурах первый сплав находится в аустенитном состоянии, а второй в мартенситном.

Образцы деформировали при комнатных температурах изгибом или кручением до различных степеней деформации, жёстко фиксировали и осуществляли термическую обработку в интервале температур от 25 до 550 °С с различной длительностью выдержки (до 10 ч) или ультразвуковую обработку с частотой ультразвуковых колебаний 22 кГц и амплитудой до ~ 8 мкм в течение ~ 1 мин. После чего определяли параметры формовосстановления (рисунок 1), запоминаемую деформацию, характеристические температуры и изменение других функциональных и механических свойств в результате указанных режимов воздействия.

Ультразвуковую обработку (УЗО) осуществляли с помощью промышленного генератора УЗДН-1М с магнитострикционным преобразователем, к которому крепили титановый волновод полуволновой длины с закрепленным в пучности смещений TiNi образцом (рисунок 2). Амплитуду УЗК измеряли на торце волновода при помощи бесконтактного виброметра.



Рисунок 1. – Схема определения параметров формовосстановления при наведении изгибных деформаций



1 – преобразователь; 2 – концентратор;
 3 – волновод; 4 – образец;
 5 – винт для крепления образца

Рисунок 2. – Блок-схема экспериментальной установки для УЗО (а) и схема крепления TiNi образца с распределением амплитуд колебательных смещений по длине волновода (б)

Характеристические температуры мартенситных превращений определяли двумя способами: методами дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC822°, Mettler Toledo) и термомеханическим методом испытаний на трёхточечный изгиб. Функциональные и механические параметры определяли по стандартным методикам при проведении испытаний на трёхточечный изгиб и кручение для тонких цилиндрических образцов. Температурные профили TiNi образцов в процессе ультразвукового воздействия изучали при помощи бесконтактной высокочувствительной тепловизионной камеры (ТН 9100, NEC).

Для определения функциональных параметров медицинских изделий из сплавов TiNi использовали методику, позволяющую по диаграммам деформирования, полученным при эксплуатационных температурах, определять развиваемые усилия, коэффициент сверхэластичности и параметры клинического плато (рисунок 3).

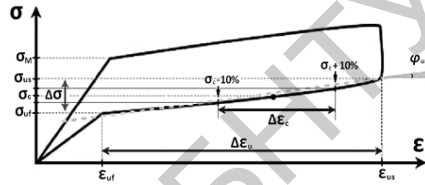


Рисунок 3. – Схема определения функциональных параметров медицинских TiNi сплавов

В **третьей главе** изложены результаты экспериментальных исследований влияния температуры и продолжительности термической обработки (ТО) образцов TiNi сплавов на задание памяти формы и характеристики мартенситных превращений.

На основании экспериментальных исследований установлено, что в результате термической обработки при температурах 100 ÷ 250 °С продеформированный и заневолненный сплав Ti-50,4 ат.% Ni «запоминает» до 80 % сообщенной ему деформации при кратковременных выдержках. Так, после выдержки в течение 5 минут при температуре 100 °С величина остаточной деформации составляет ~ 42 % от наводимой, при 150 °С — ~ 69 %, а при 200 °С и 250 °С — уже ~ 76 % и ~ 80 % соответственно, в то время как в образцах без термообработки ~ 7 %. При этом продолжительность выдержки оказывает слабое влияние на запоминаемую деформацию — так, изменение длительности выдержки с 0,1 ч до 10 ч приводит к увеличению запоминаемой деформации на ~ 4 %, что обусловлено малой интенсивностью протекания релаксационных процессов. Запоминание деформации в результате термического воздействия в рассматриваемом диапазоне температур может быть обусловлено переходом части деформации, накопленной по каналам мартенситной неупругости, в пластическую деформацию

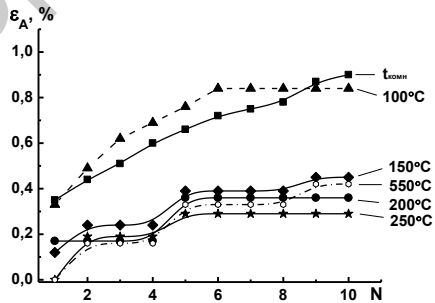


Рисунок 4. – Зависимости остаточной деформации от количества механоциклов для сплава Ti-50,4 ат.% Ni после ТО при указанных температурах

аустенита при реализации обратного мартенситного превращения в заневоленном состоянии, сопровождаемого частичной релаксацией внутренних напряжений и изменениями в дислокационной структуре материала. Вследствие того, что обработка осуществляется при относительно низких температурах, структурных изменений (в виде образования вторичных фаз и пр.) в материале не происходит, что подтверждается отсутствием изменений калориметрических зависимостей сплава. Дальнейшие исследования, проведенные с использованием термообработки при температуре 200 °С в течение 5 минут, показали, что при увеличении наводимой деформации (до ~ 20 %) значения остаточных деформаций возрастают линейно и составляют ~ 77 ÷ 80 % от наводимой. При этом во всех образцах, испытывавших термическое воздействие, после снятия приложенной нагрузки упругий возврат значительно меньше (~ 0,3 % в сравнении с 2-3 % для образцов без обработки), а в случае малых деформаций (до 5 %) отсутствует вовсе. Результаты исследования величины ЭПФ при термо- и механоциклировании образцов показали (рисунок 4), что термическая обработка при температурах 150 ÷ 250 °С способствует стабилизации деформационных свойств сплава Ti-50,4 ат.% Ni — так, после деформирования до 6 % и нагрева выше A_k деформация недовозврата на 0,5 % ниже, чем в образцах без обработки, и к 5-му циклу стабилизируется.

Установлены зависимости запоминаемой деформации и характеристических температур от температуры и продолжительности термического воздействия для сплава Ti-50,8 ат.% Ni (рисунок 5). Показано, что в результате термообработки при температурах, не превышающих 300 °С, материал «запоминает» не более 50 % наводимой деформации, причем изменение продолжительности выдержки в пределах двух часов на результат влияния не оказывает.

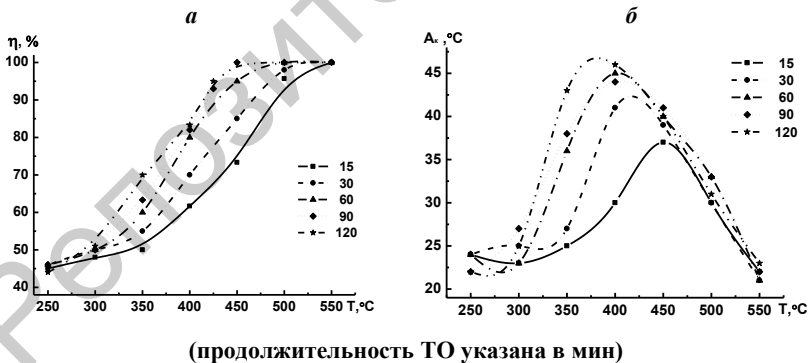


Рисунок 5. – Зависимости запоминаемой деформации (а) и температуры окончания обратного мартенситного превращения (б) для сплава Ti-50,8 ат.% Ni от температуры и продолжительности ТО

При температурах, превышающих 300 °С, с увеличением продолжительности обработки увеличиваются и значения запоминаемой деформации, что обусловлено активизацией в материале релаксационных процессов, протекающих при разных

температурах с различной интенсивностью. Так, при температуре 350 °С запоминаемая деформация увеличивается линейно в зависимости от продолжительности термического воздействия. Однако при температуре 400 °С максимальное накопление пластической деформации (~ 80 % от наводимой) осуществляется в течение первого часа обработки, а за последующий час запоминаемая деформация увеличивается всего на ~ 3 % и составляет ~ 83 % от наводимой. 100 %-ное «запоминание» деформации осуществляется в результате ТО при температуре 450 °С в течение 1,5 часа, при 500 °С в течение часа и при 550 °С в течение 15 минут.

По результатам анализа калориметрических зависимостей образцов после термообработки построены диаграммы изменения характеристических температур от температуры и продолжительности выдержки, позволяющие осуществлять выбор оптимального режима ТО для получения требуемого температурного диапазона срабатывания. На основании совокупности всех полученных результатов разработана методика обработки медицинского сплава Ti-50,8 ат.% Ni, содержащая алгоритм действий, которые необходимо совершить с полуфабрикатом в состоянии поставки, чтобы получить готовые TiNi элементы конструкции с требуемым комплексом функциональных характеристик.

При медицинском применении TiNi сплавов в качестве имплантационного материала, несмотря на связанное состояние никеля, который является токсичным для живых тканей, часто в качестве барьерного слоя от его проникновения в организм используют защитные покрытия. В результате экспериментальных исследований влияния процесса нанесения защитных покрытий TiN и Ti толщиной ~ 1-2 мкм методами вакуумного ионно-плазменного напыления на характер реализации мартенситных превращений в сплаве Ti-50,8 ат.% Ni, находящемся в состоянии поставки, показано, что сам процесс напыления оказывает значительное воздействие на кинетику и температурный диапазон реализации мартенситных превращений, что связано с высоким энергетическим воздействием на материал (рисунок 6).

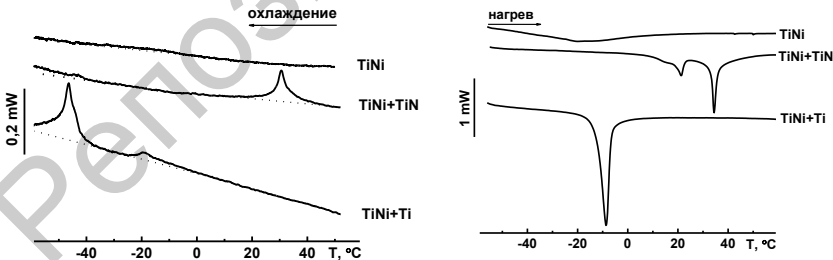


Рисунок 6. – Калориметрические зависимости для сплава Ti-50,8 ат.% Ni до и после нанесения покрытий TiN и Ti

При этом наблюдается изменение схемы реализации фазовых переходов с B2 → R на B2 → R → B19', увеличение их энтальпии и характеристических температур. Так, в образцах с покрытием TiN сдвиг пиковой температуры перехода

B2 → R составил ~ 50 °С, а энтальпия превращения ~ 2,6 Дж/г (в сравнении с ~ 0,7 Дж/г для материала в исходном состоянии), в то же время при нанесении открытой Ti большому воздействию подверглись параметры перехода R → B19'. Установлено, что применение термообработки при 500 °С в течение 30 минут практически полностью устраняет влияние процесса вакуумного ионно-плазменного напыления на термомеханические свойства сплава.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния ультразвукового воздействия на задание памяти формы и функциональные свойства сплава Ti-50,4 ат.% Ni, изучению кинетики нагрева материала в процессе ультразвуковой обработки и разработке модели запоминания деформации в результате низкотемпературной обработки.

Результаты тепловизионных исследований кинетики нагрева деформированных и заневоленных образцов в процессе УЗО (рисунок 7) показали, что увеличение температуры в материале осуществляется в два этапа: сначала она резко возрастает до температуры начала обратного мартенситного превращения в ненапряженном материале A_n , затем скорость нагрева уменьшается, и, достигнув некоторого максимального значения, превышающего температуру окончания обратного мартенситного превращения в ненапряженном материале $A_k = 57$ °С на ~ 8-15 °С, уменьшается до ~ A_k , далее практически не изменяясь до момента выключения ультразвука.

Наблюдаемое увеличение температуры обусловлено поглощением энергии УЗК, при этом первый этап соответствует нагреву материала в мартенситной фазе, а второй этап соответствует реализации обратного мартенситного превращения, и продолжается до перехода в аустенитное состояние, в котором его внутреннее трение ниже по сравнению с мартенситным и двухфазным, вследствие чего дальнейшего нагрева не происходит. Последующее уменьшение температуры материала до A_k может быть обусловлено частичной релаксацией внутренних напряжений. В таком случае, максимальная температура образца в процессе УЗО соответствует температуре окончания обратного мартенситного перехода в напряженном материале A_k^σ .

На основании экспериментальных исследований впервые обнаружено, что в процессе ультразвуковой обработки деформированного и заневоленного сплава Ti-50,4 ат.% Ni материал частично «запоминает» сообщенную ему деформацию, причем величина запоминаемой деформации зависит от интенсивности и продолжительности ультразвукового воздействия (рисунок 8а). Так, после

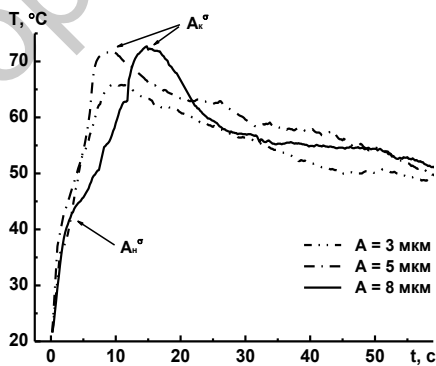


Рисунок 7. – Зависимости максимальной температуры деформированного образца сплава Ti-50,4 ат.% Ni от продолжительности ультразвукового воздействия различной интенсивности

деформирования образца в мартенситной фазе на $\sim 8,3\%$, упругого возврата до $\sim 6,3\%$ и УЗО жёстко зафиксированного образца значения восстанавливаемой деформации $\varepsilon_{\text{пф}}$ составили: $\sim 4,2\%$ для $A \approx 3$ мкм, $\sim 3,9\%$ для $A \approx 5$ мкм и $\sim 2,1\%$ для $A \approx 8$ мкм, в то время как в образце, не подвергнутом ультразвуковому воздействию, $\varepsilon_{\text{пф}} \approx 4,6\%$, т.е. величина запоминаемой в процессе УЗО деформации составила $\sim 33\%$, $\sim 38\%$ и $\sim 67\%$ соответственно.

Исследование динамики восстановления деформации в первом цикле нагрева после УЗО показало, что ультразвуковое воздействие приводит к расширению температурного интервала формовосстановления и изменению характеристических температур в зависимости от интенсивности ультразвукового воздействия. В образцах после УЗО восстановление деформации осуществляется в две стадии: первая начинается при температуре $\sim 45^\circ\text{C}$, а температурный интервал реализации второй стадии с увеличением амплитуды УЗК сдвигается в сторону повышения температур и составляет: $\sim 58 \div 69^\circ\text{C}$ для амплитуды $A \approx 3$ мкм, $\sim 62 \div 82^\circ\text{C}$ для $A \approx 5$ мкм и $\sim 79 \div 100^\circ\text{C}$ для $A \approx 8$ мкм, — в то время как в образцах, не подвергнутых УЗО, возврат деформации протекает одностадийно в температурном диапазоне $\sim 61 \div 74^\circ\text{C}$. Первую стадию можно объяснить процессами раздвоивания мартенсита и возвратного движения дислокаций, обусловленными последствиями ультразвукового воздействия. Особенности протекания второй стадии свидетельствуют о том, что возврат деформации в данном случае осуществляется непосредственно в процессе реализации перехода мартенсит \rightarrow аустенит. Результаты дальнейших исследований показали, что при увеличении наводимой деформации значение запоминаемой деформации также увеличивается, однако во всех случаях составляет $\sim 67\%$ от наведенной деформации.

Анализ диаграмм деформирования образцов в мартенситной фазе после УЗО свидетельствует об уменьшении фазового предела текучести σ_m с увеличением интенсивности УЗК, — так, в образцах после УЗО с $A \approx 8$ мкм $\sigma_m \approx 120$ МПа, а после обработки с $A \approx 5$ мкм $\sigma_m \approx 150$ МПа, в то время как в не обработанных образцах $\sigma_m \approx 210$ МПа (рисунок 8б).

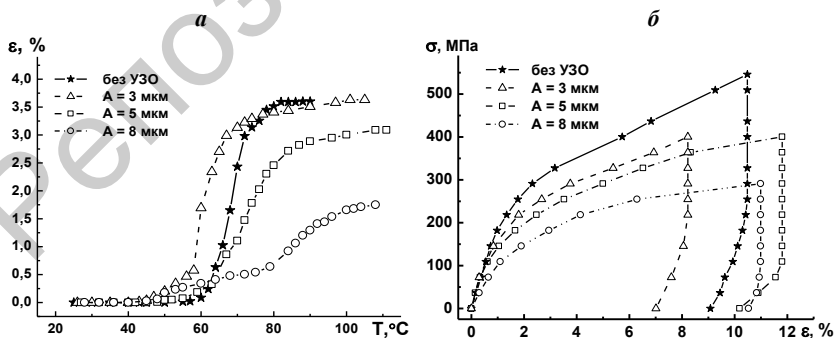


Рисунок 8. – Зависимости восстанавливаемой деформации от температуры (а) и диаграммы деформирования (б) образцов сплава Ti-50,4 ат.% Ni после УЗО различной интенсивности

Такое снижение фазового предела текучести должно способствовать увеличению ресурса обратной деформации при реализации эффекта памяти формы, – и действительно, в образцах после УЗО в последующем деформировании и нагревании через интервал обратного мартенситного превращения формовосстановление больше (на ~ 20 %), чем в необработанных образцах.

На основании обобщения экспериментальных данных и анализа полученных зависимостей запоминаемой деформации в процессе УЗО и ТО при температурах 100 ÷ 250 °С предложен механизм запоминая деформации при низкотемпературной обработке, заключающийся в реализации обратного мартенситного превращения в деформированном и заневоленном материале и связанной с ней частичной релаксацией внутренних напряжений, в результате чего часть деформации, наведенной в мартенситной фазе, переходит в пластическую деформацию аустенитной фазы.

Результаты дополнительных экспериментальных исследований нагрева деформированных образцов сплава Ti-50,4 ат.% Ni под нагрузкой показали, что температура окончания обратного мартенситного превращения возрастает с увеличением приложенного напряжения в соответствии с уравнением Клаузиуса-Клапейрона, однако не превышает ~ 160 °С, при этом максимальное значение развиваемого усилия составляет ~ 300 МПа при деформировании на 4,5 %. Результаты теоретических исследований, проведенных на основе структурно-аналитической теории прочности, хорошо согласуются с экспериментальными данными (рисунок 9), подтверждая, таким образом, предложенный механизм.

В пятой главе рассмотрено практическое применение полученных результатов: способы низкотемпературного задания памяти формы и технология изготовления изделий из TiNi сплавов, обеспечивающая им повышенные функциональные свойства.

На основании анализа результатов исследования влияния термической и ультразвуковой обработки на запоминаемую деформацию предложены способы низкотемпературного задания памяти формы, обеспечивающие требуемую форму и высокие характеристики формовосстановления. В связи с тем, что при инициировании обратного мартенситного пре-

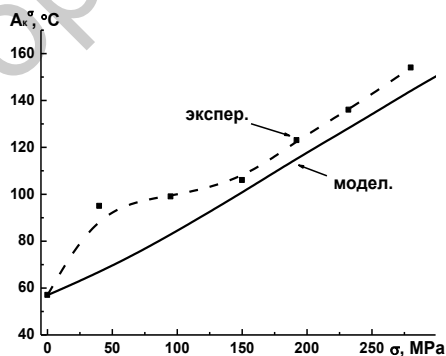


Рисунок 9. – Температура окончания обратного мартенситного превращения в деформированном TiNi сплаве под нагрузкой

ращения в напряженном материале посредством ультразвукового воздействия A_k° существенно ниже, чем при использовании обычного термического нагрева, максимальная температура материала в процессе УЗО всего на ~ 15 °С превышает A_k , что для сплава Ti-50,4 ат.% Ni составляет ~ 72 °С – столь малый разогрев материала при задании памяти формы не имеет аналогов, обеспечивая возможность обра-

батывать композиционные конструкции из сплавов TiNi, помещенных в полимерную оболочку.

Разработана технология изготовления изделий из TiNi сплавов, которая позволяет определить оптимальный режим обработки с целью задания памяти формы конструкции и обеспечения требуемых функциональных свойств – температурного диапазона срабатывания, восстанавливаемой деформации и развиваемых усилий, – а также значительно снизить температуру обработки изделия на этапе задания памяти формы. Схема технологического процесса включает следующие основные операции: входной контроль функциональных свойств полуфабриката из сплава TiNi; установление оптимального режима обработки с учётом требований, предъявляемых к изделию; формообразование конструкции и её заневоливание; обработка конструкции согласно установленному режиму; контроль функциональных свойств изделия. В случае использования термообработки при температурах, превышающих 300 °С, необходимо проведение дополнительной операции по очистке поверхности. Внедрение технологии реализовано при изготовлении опытных образцов ортодонтических дуг из TiNi сплава, экспериментальных образцов конструкций дилататоров для проведения гинекологических операций и внутриматочного противозачаточного устройства с памятью формы.

В результате исследований ортодонтических дуг зарубежных производителей установлено, что функциональные характеристики для аналогичных изделий значительно различаются, а также, что для изготовления термоактивируемых и сверхэластичных дуг используют TiNi сплавы с различным содержанием никеля. На основании результатов диссертационного исследования установлены режимы обработки сплава состава Ti-55,77 вес.% Ni российского производства, позволяющие использовать его для получения обоих типов дуг, при этом, как показал сравнительный анализ, по своим функциональным характеристикам изготовленные опытные образцы (рисунок 10а) не уступают зарубежным аналогам. Разработаны проекты Технических условий (ТУ ВУ 300229851.005–проект) и Технологической инструкции на производство ортодонтических дуг из сплавов ТН-1 с эффектом памяти формы в Республике Беларусь.

В сотрудничестве с врачами гинекологического отделения Витебского областного клинического специализированного центра разработаны две конструкции дилататоров с рабочей частью, выполненной из

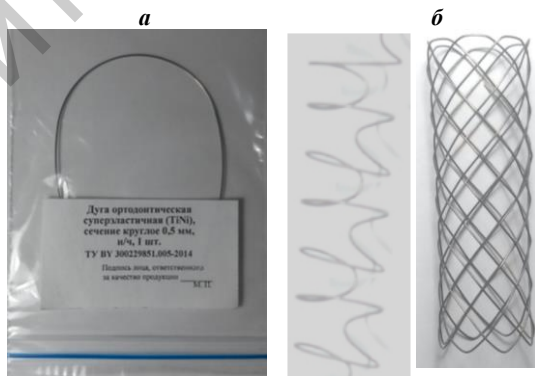


Рисунок 10. – Вид опытного образца сверхэластичной ортодонтической дуги (а) и экспериментальных образцов рабочей части дилататора (б) из TiNi сплава

сплава TiNi с эффектом памяти формы (рисунок 10б), которые обеспечивают быстрое расширение цервикального канала при необходимости проведения срочных операций. Испытания изготовленных экспериментальных образцов дилататоров, проведенные в клинических условиях на удаленных органах, показали, что каждый из них обеспечивает расширение канала шейки матки в течение 7-10 с при однократном введении устройства, снижая при этом вероятность инфицирования и травмирования внутренних органов.

Совместно с сотрудниками медицинского предприятия «Симург», специализирующегося на изготовлении гинекологической продукции, на основе кольцеобразного внутриматочного контрацептива разработана и запатентована полезная модель внутриматочного противозачаточного устройства с элементами сверхэластичной TiNi проволоки с памятью формы, обеспечивающая стабильное усилие при воздействии на стенку матки, что снижает вероятность экспульсии устройства, а также повышает удобство и безопасность его введения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате экспериментальных исследований зависимости запоминаемой деформации от температуры и продолжительности термической обработки для сплава Ti-50,8 ат.% Ni, испытавшего деформацию в аустенитной фазе, установлено, что величина запоминаемой деформации при температурах обработки $250 \div 300$ °C и продолжительности до 2 ч составляет $\sim 50 \pm 3$ % от наводимой, а при повышении температуры обработки до 500 °C увеличивается до 100 %, что обусловлено структурными изменениями и интенсификацией релаксационных процессов, протекающих в материале в указанном диапазоне температур. Установлено, что длительность термообработки для запоминания деформации с увеличением температуры уменьшается, — так, полное «запоминание» деформации осуществляется в результате термического воздействия при температуре 450 °C в течение 1,5 ч, а при температуре 550 °C в течение 15 мин [1, 2, 4–6, 9–11, 14, 16–19, 24, 26].

2. В результате экспериментальных исследований влияния температуры и продолжительности термической обработки на величину запоминаемой деформации для сплава Ti-50,4 ат.% Ni, деформирование которого осуществляли в мартенситной фазе, установлено, что при увеличении температуры термического воздействия от 25 до 250 °C величина запоминаемой деформации увеличивается с 7 до 80 % от наводимой, что связано с переходом части деформации, накопленной по каналам мартенситной неупругости, в пластическую деформацию аустенита. При этом продолжительность термообработки при изотермической выдержке в указанном интервале температур оказывает слабое влияние на запоминаемую деформацию – так, изменение длительности выдержки с 0,1 ч до 10 ч приводит к увеличению запоминаемой деформации на ~ 4 %, что обусловлено малой интенсивностью протекания релаксационных процессов [1, 8, 12, 20].

3. Впервые обнаружено, что задание памяти формы конструкциям из сплавов TiNi можно осуществлять только за счет энергии ультразвуковых колебаний, и установлена зависимость запоминаемой деформации для сплава Ti-50,4 ат.% Ni от

интенсивности и продолжительности ультразвукового воздействия. Выявлено, что величина запоминаемой деформации возрастает при увеличении интенсивности ультразвука – так, после наведения в мартенситной фазе неупругой деформации 6,3 %, жёсткой фиксации в деформированном состоянии и ультразвуковой обработки с частотой колебаний 22 кГц в воздушной среде при температуре $\sim 20 \pm 3$ °C в течение ~ 1 мин значения восстанавливаемой деформации $\varepsilon_{\text{пф}}$ составили: $\sim 4,2$ % для $A \approx 3$ мкм, $\sim 3,9$ % для $A \approx 5$ мкм и $\sim 2,1$ % для $A \approx 8$ мкм, в то время как в образце, не подвергнутом ультразвуковому воздействию, $\varepsilon_{\text{пф}} \approx 4,6$ %, т.е. величина запоминаемой в процессе УЗО деформации составила ~ 33 %, ~ 38 % и ~ 67 % соответственно [1, 3, 7, 8, 13, 21–23, 25].

4. На основании экспериментальных исследований обнаружено снижение фазового предела текучести, изменение динамики и расширение температурного интервала формовосстановления в образцах сплава Ti-50,4 ат.% Ni в результате их ультразвуковой обработки в заневоленном состоянии после деформирования в мартенситной фазе. Установлено, что при увеличении интенсивности ультразвукового воздействия фазовый предел текучести снижается, что обуславливает увеличение ресурса обратимой деформации – так, формовосстановление в образцах после УЗО на ~ 20 -30 % выше. Выявлено, что восстановление деформации в образцах после ультразвукового воздействия осуществляется двустадийно: первая стадия начинается при температуре ~ 45 °C, а температурный интервал реализации второй стадии зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний и при её увеличении сдвигается в сторону повышения температур, – так, для $A \approx 3$ мкм он составляет $\sim 58 \div 69$ °C, для $A \approx 5$ мкм – $\sim 62 \div 82$ °C и для $A \approx 8$ мкм – $\sim 79 \div 100$ °C, в то время как в образцах, не подвергнутых УЗО, восстановление деформации протекает одностадийно в интервале температур $\sim 61 \div 74$ °C [3, 7, 8, 13, 22, 23, 25].

5. На основании анализа результатов тепловизионных исследований обнаружено значительное снижение температуры окончания обратного мартенситного превращения в напряженном TiNi сплаве в процессе ультразвукового воздействия по сравнению с термическим и установлены закономерности изменения температуры напряженного сплава Ti-50,4 ат.% Ni от интенсивности и продолжительности ультразвуковой обработки. Определено, что при включении ультразвука сначала наблюдается увеличение температуры материала, которое реализуется двустадийно: возрастание в течение 2-3 с до температуры начала обратного мартенситного превращения в ненапряженном материале A_n (~ 40 °C), а затем скорость увеличения температуры уменьшается и за следующие 5-10 с температура материала достигает некоторого максимального значения (~ 72 °C), превышающего температуру окончания обратного мартенситного превращения A_k в ненапряженном материале на ~ 15 °C, – после чего в течение ~ 10 с наблюдается снижение температуры до $\sim A_k$, и далее её значение практически не изменяется до момента выключения ультразвука [3, 7, 8, 13, 15].

6. Предложен механизм низкотемпературного процесса задания памяти формы, заключающийся в реализации обратного мартенситного превращения в деформированном и заневоленном материале и связанной с ней частичной релаксацией внутренних напряжений, в результате чего часть деформации, наведенной в мартенситной фазе, переходит в пластическую деформацию аустенитной фазы. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований темпе-

ратурного интервала реализации обратного мартенситного превращения в сплаве Ti-50,4 ат.% Ni от величины приложенного напряжения определены значения характеристических температур обратного перехода, коррелирующие с величиной запоминаемой деформации, тем самым подтверждающий предложенный механизм [7, 8].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработана и внедрена в производство ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» технология термической обработки сплава TiNi для изготовления ортодонтических дуг с повышенными функциональными свойствами.

2. На основании результатов исследований разработана технология изготовления изделий из TiNi сплавов, которая позволяет определить оптимальный режим обработки полуфабриката с целью задания памяти формы конструкции и обеспечения требуемых функциональных свойств, а также снизить температуру и продолжительность обработки изделия на этапе задания памяти формы.

3. Разработана технология изготовления ортодонтических дуг, обеспечивающая получение из сплава химического состава Ti-55,77 вес.% Ni как сверхэластичных, так и термоактивируемых типов дуг (ТУ ВУ 300229851.005–проект), не уступающих по своим функциональным характеристикам импортным аналогам. Изготовлены опытные образцы сверхэластичных и термоактивируемых ортодонтических дуг, которые успешно прошли технические и санитарно-гигиенические испытания и в настоящее время утверждается программа для проведения их клинических испытаний.

4. Разработаны конструкции и изготовлены экспериментальные образцы дилататоров цервикального канала с эффектом памяти формы, обеспечивающие быстрое расширение цервикального канала при однократном введении в случае необходимости проведения срочных гинекологических операций. Проведены их испытания на удаленных органах в клинических условиях.

5. Разработано и запатентовано внутриматочное противозачаточное устройство с элементами сверхэластичной TiNi проволоки с памятью формы, обеспечивающее стабильное усилие при воздействии на стенку матки. Внедрена в производство ЗАО «Медицинское предприятие Сатурн» технология изготовления внутриматочных контрацептивов из материала с эффектом памяти формы, обеспечивающих стабильность кольцеобразной формы и механических характеристик во время эксплуатации в течение длительного периода времени.

6. Предложены способы низкотемпературного задания памяти формы, заключающиеся в формоизменении конструкции в мартенситной фазе, её заневолении и нагреве в заневолённом состоянии до температуры окончания обратного мартенситного превращения под нагрузкой A_k^{σ} термическим или ультразвуковым воздействием с последующим охлаждением ниже температуры окончания прямого мартенситного превращения под нагрузкой M_k^{σ} .

7. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке студентов в Учреждении образования «Витебский государственный технологический университет».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Милюкина, С. Н. Технологические приемы обработки TiNi проволоки / С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Современные перспективные материалы / Под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – Гл. 18. – С. 511–536.

Статьи в рецензируемых научных изданиях

2. Heat treatment of TiNi wire used for intrauterine contraceptives / V.G. Dorodeiko, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr., S.N. Miliukina // Materials Science and Engineering A, Volumes 481-482, 25 May 2008 – Pp. 616–619.

3. Influence of Ultrasonic Treatment on Shape Memory Effects in Ti-50,4 at.%Ni Alloy / V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr., V.G. Dorodeiko, S.N. Miliukina // Materials Science Forum, Volumes 738-739 (2013) – Pp. 362–366.

4. Мартенситные превращения в никелиде титана после ионно-плазменного напыления TiN покрытия / В.В. Клубович, В.В. Рубаник мл., В.В. Рубаник, Д.А. Багрец, С.Н. Милюкина, В.Г. Дородейко // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – Т. 18, № 2. – С.47–51.

5. Технологические особенности получения сверхэластичных ортодонтических дуг на основе TiNi/ В.В. Клубович, С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., В.А. Андреев // Материалы, технологии, инструменты. – 2014. – Т.19, № 2. – С.62–67.

6. Разработка технологии получения ортодонтических дуг из титан-никелевых сплавов / С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), В.А. Андреев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 6. – С.61–65.

7. Влияние ультразвуковой обработки на эффект памяти формы и функциональные свойства TiNi сплавов / В.В. Рубаник, В.В. Клубович, С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник мл. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов в 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редколлегия: С.А. Астапчик [и др.] – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 239–249.

8. Рубаник, В.В. Способы обработки и модель процесса низкотемпературного задания памяти формы сплавам TiNi / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), С.Н. Милюкина // Вестник ПГУ, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С.69–76.

9. Использование материалов с эффектом памяти формы для изготовления внутриматочных контрацептивов / В.В. Рубаник, С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник мл., В.Г. Дородейко, А.Ю. Журавлев // Охрана материнства и детства. – 2007. – №2 (10). – С. 92–96.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

10. Влияние времени и температуры тепловой обработки на функциональные свойства проволоки никелида титана для медицинского применения / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., С.Н. Милюкина, В.Г. Дородейко // XLVI Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности», 15–17 октября 2007 г. Витебск,

Беларусь : материалы конф.: в 2 ч. – УО «ВГТУ». – Витебск, 2007. – Ч. 1. – Витебск, 2007. – С. 321–323.

11. Рубаник, В. В. Оптимизация режимов термообработки TiNi проволоки медицинского назначения / В.В. Рубаник, С.Н. Милокина, В.В. Рубаник мл. // Сборник докладов 8-й международной конференции «Авангардные машиностроительные технологии», Болгария, 18–20 июня 2008 г. – С. 199–203.

12. Влияние условий деформирования и низкотемпературной обработки на задание памяти формы в никелиде титана / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., С.Н. Милокина, В.Г. Дородейко // 50-й Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности», 27 сентября – 1 октября 2010 г., Витебск, Беларусь: сборник материалов: в 2 ч. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2010. – Ч. 2. – С. 209–212.

13. Рубаник, В.В. Влияние ультразвуковой обработки на деформационные эффекты в Ti-50,4ат.%Ni / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., С.Н. Милокина // Межд. симп. «Перспективные материалы и технологии», 29 мая – 1 июня 2013 г. Витебск, Беларусь: сб. статей / УО «ВГТУ». – Витебск, 2013. – С. 197–199.

14. Мартенситные превращения в сверхэластичных ортодонтических TiNi дугах / С.Н. Милокина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), В.А. Андреев, В.Г. Дородейко // Международная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы», 26–30 мая 2014 г., Витебск, Беларусь: материалы конференции / УО «ВГТУ». – Витебск, 2014. – С. 148–150.

15. Динамика ультразвукового нагрева TiNi сплавов с эффектом памяти формы / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), А.В. Шадурский, С.Н. Милокина // Перспективные материалы и технологии: сборник материалов межд. симпозиума, 27–29 мая 2015 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2015. – С. 320–322.

16. Дилататор цервикального канала с эффектом памяти формы / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), С.А. Легкоступов, А.Ю. Журавлёв, В.Г. Дородейко, С.Н. Милокина // Перспективные материалы и технологии: сборник материалов межд. симпозиума, 27–29 мая 2015 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2015. – С. 317–319.

Тезисы докладов

17. Effect of the heat treatment on the pseudoelastic properties of TiNi wire for medical application / S.N. Miliukina, V.G. Dorodeiko, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr. // European Materials Research Society E-MRS Fall Meeting: abstracts / Warsaw University of Technology, 17–21 September, 2007, Warsaw, Poland. – 2007. – Pp. 152–153.

18. Time effect of the heat treatment on the functional properties of TiNi wire for intrauterine contraceptives / S.N. Miliukina, V.G. Dorodeiko, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr. // European Congress on Advanced Materials and Processes EURO-MAT 2007, 10–13 September, Nürnberg, Germany. – 2007. – P. 97.

19. Милокина, С. Н. Термомеханическая обработка проволоки Ti-50,8ат.%Ni / С.Н. Милокина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», 25–29 мая 2009 г. : сб. тез. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2009. – С. 205.

20. Милокина, С. Н. Задание формы в TiNi проволоке низкотемпературной обработкой / С.Н. Милокина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Международный

симпозиум «Перспективные материалы и технологии», 25–29 мая 2009 г. : сб. тез. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2009. – С. 204.

21. Милюкина, С. Н. Ультразвуковая обработка проволоки TiNi с целью задания формы / С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Сборник тезисов XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов», Россия, Самара, 23–25 июня 2009 г. / Самарский ГТУ. – 2009. – С. 71.

22. Милюкина, С. Н. Влияние ультразвуковой обработки на эффект памяти формы в сплавах TiNi / С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // VI Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (ФППК-2010), Черноголовка, 2010. – С. 152.

23. Influence of ultrasonic treatment on shape memory effects in Ti-50,4% Ni alloy / S.N. Miliukina, V.G. Dorodeiko, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr. // 9 European symposium on martensitic transformation ESOMAT 2012, 9–16 sept. 2012, Saint-Petersburg, Russia. – P. 92.

24. Исследование влияния процесса нанесения защитного покрытия на функциональные свойства сплава с памятью формы / С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., Д.А. Багрец // 45 научно-техническая конференция преподавателей и студентов университета УО «ВГТУ»: тезисы докладов. – Витебск, 2012. – С. 90–91.

25. Ultrasonic Influence on the Behavior of Shape Memory Alloys / S.N. Miliukina, V.V. Klubovich, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik Jr. // SMST 2013, May 20–24, 2013, Prague, Czech Republic. – P. 76.

Патент

26. Пат. 4440 Рэсп. Беларусь, МПК А61F6/14. Внутриматочное противозачаточное устройство / С. Н. Милюкина, В. В. Рубаник (мл.), В. В. Рубаник, В. Г. Дорудейко, А. Ю. Журавлев; заявители: «Институт технической акустики НАН Беларуси» и ЗАО «Медицинское предприятие Сатург». – № и 20070484 ; заявл. 04.07.2007 ; опубл. 10.11.2007 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2007. – № 4 (31). – С. 155.

РЭЗЬЮМЭ

Мілюкіна Святлана Мікалаеўна

**ТЭХНАЛОГІЯ АТРЫМАННЯ ВЫРАБАЎ СА СПЛАВАЎ
TiNi З ВЫКАРЫСТАННЕМ ТЭРМІЧНАЙ
І ЎЛЬТРАГУКАВОЙ АПРАЦОВАК**

Ключавыя словы: эфект памяці формы, TiNi сплавы, тэрмапругкія мартэнсітныя пераходы, тэрмічная апрацоўка, вырабы з памяццю формы, ультрагук.

Мэта даследаванняў – распрацоўка тэхналогіі атрымання вырабаў са сплаваў TiNi з выкарыстаннем тэрмічнай і ўльтрагукавой апрацовак, якая забяспечвае ім павышаныя функцыянальныя ўласцівасці.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: метады эксперыментальнага даследавання функцыянальных уласцівасцяў сплаваў з памяццю формы; стандартныя метадыкі выпрабаванняў на трохкропковы выгіб і скрут; метады дыферэнцыяльнай сканіруючай каларыметрыі; метады інфрачырвонай тэрмаграфіі; структурна-аналітычная тэорыя трываласці.

Атрыманая вынікі і іх навізна: устаноўлены залежнасці велічыні запамінальнай дэфармацыі ад тэмпературы і працягласці тэрмічнай апрацоўкі. Упершыню паказана магчымасць задання памяці формы канструкцыі з TiNi сплаву толькі за кошт энергіі ўльтрагукавых ваганняў, і ўстаноўлена залежнасць запамінальнай дэфармацыі ад інтэнсіўнасці ўльтрагукавога ўздзеяння. Усталявана залежнасць тэмпературы напружанага TiNi сплаву ад інтэнсіўнасці і працягласці ўльтрагукавога ўздзеяння. Паказана, што з павелічэннем інтэнсіўнасці ўльтрагукавой апрацоўкі фазавая мяжа цяжучасці ў матэрыяле памяншаецца, пры гэтым павялічваецца рэсурс зварачальнай дэфармацыі. Прапанаван механізм нізкатэмпературнага працэсу задання памяці формы, які ўстанаўлівае сувязь паміж запамінальнай дэфармацыяй і тэмпературай апрацоўкі матэрыялу.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны для атрымання вырабаў са сплаваў TiNi з памяццю формы; вынікі працы ўкаранены ў вытворчасць ТАА «Прамысловы цэнтр “МАТЭК-СПФ”» і ЗАТ «Медыцынскае прадпрыемства “Сімург”».

Галіна прымянення: на прамысловых прадпрыемствах, якія вырабляюць вырабы з эфектам памяці формы.

РЕЗЮМЕ

Милокина Светлана Николаевна

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ СПЛАВОВ TiNi С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ
И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТОК**

Ключевые слова: эффект памяти формы, TiNi сплавы, термоупругие мартенситные превращения, термическая обработка, изделия с памятью формы, ультразвук.

Цель исследований – разработка технологии изготовления изделий из сплавов TiNi с использованием термической и ультразвуковой обработок, обеспечивающей им повышенные функциональные свойства.

Методы исследования и использованная аппаратура: методы экспериментального исследования функциональных свойств сплавов с памятью формы; стандартные методики испытаний на трехточечный изгиб и кручение; методы дифференциальной сканирующей калориметрии; методы инфракрасной термографии; структурно-аналитическая теория прочности.

Полученные результаты и их новизна: установлены зависимости запоминаемой деформации от температуры и продолжительности термической обработки. Впервые показана возможность задания памяти формы конструкции из TiNi сплава только за счет энергии ультразвуковых колебаний, и установлена зависимость запоминаемой деформации от интенсивности ультразвукового воздействия. Установлена зависимость температуры напряженного TiNi сплава от интенсивности и продолжительности ультразвукового воздействия. Показано, что с увеличением интенсивности ультразвуковой обработки фазовый предел текучести в материале уменьшается, при этом увеличивается ресурс обратимой деформации. Предложен механизм низкотемпературного процесса задания памяти формы, устанавливающий связь между запоминаемой деформацией и температурой обработки материала.

Рекомендации по использованию: результаты исследований могут быть использованы при изготовлении изделий из TiNi сплавов с памятью формы; результаты работы внедрены в производство ООО «Промышленный центр «МАТЭК-СПФ»» и ЗАО «Медицинское предприятие «Симург»».

Область применения: на промышленных предприятиях, изготавливающих изделия с эффектом памяти формы.

Репозиторий БНТУ

SUMMARY

Miliukina Sviatlana

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING THE PRODUCTS FROM TiNi ALLOYS WITH HEAT AND ULTRASOUND TREATMENTS

Keywords: shape memory effect, TiNi alloys, thermoelastic martensitic transformations, heat treatment, ultrasound, products with shape memory.

Purpose of research: development of the technology of manufacturing products from TiNi alloys with heat and ultrasound treatments, providing them enhanced functional properties.

Research methods and equipment: experimental methods of shape memory alloys functional properties study; Standard Test Method for three-point bending and torsion; differential scanning calorimetry; methods of infrared thermography; structural-analytical theory of strength.

Obtained results and their novelty: It is determined the dependences of memorized deformation on temperature and duration of heat treatment. For the first time the opportunity of setting the shape memory to products design from TiNi alloys by the energy of ultrasonic vibrations only is shown, and the dependence of memorized strain on the ultrasound intensity is determined. The dependence of loading TiNi alloy on intensity and duration of sonication is researched. It is shown that an increase of the ultrasonic intensity reduces the material phase yield stress, thereby increased the resource of reversible deformation. The mechanism of the low-temperature shape memory setting which determines the dependence between the memorized deformation and temperature treatment is developed.

Recommendations for usage: the results of research can be used for manufacturing the products from TiNi alloys with shape memory; the work introduced in the production of "Industrial Center MATEK-SMA" and "Medical enterprise Simurg".

Field of application: industry enterprises for manufacturing the products with shape memory effect.

МИЛЮКИНА
Светлана Николаевна

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ СПЛАВОВ TiNi С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ
И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТОК**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки