

На правах рукописи

ОСТРОПИКО Евгений Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ РАБОЧИХ
ЭЛЕМЕНТОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

01.02.04—Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург 2018

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, с.н.с., профессор кафедры теории упругости СПбГУ
Разов Александр Игоревич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Помыткин Сергей Павлович
(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры высшей математики)

кандидат физико-математических наук,
Николаев Владимир Иванович
(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, ведущий научный сотрудник – заведующий лабораторией Физики профилированных кристаллов)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва.

Защита состоится “___” _____ 2018 г. на заседании диссертационного совета Д 212.232.30 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9 и на сайте: <https://disser.spbu.ru/files/disser2/disser/Tz7WsybL22.pdf>

Автореферат разослан “___” _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Кустова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Материалы с термоупругими мартенситными превращениями обладают рядом уникальных свойств: эффект памяти формы (ЭПФ), эффект пластичности превращения (ЭПП), эффект обратимой памяти формы (ОПФ), псевдоупругость (сверхупругость) и эффект генерации реактивных напряжений. Отдельные материалы обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью и биосовместимостью. Благодаря этим особенностям материалы с памятью формы нашли применение в самых различных областях, и в каждом случае они обладают вполне определенной функциональностью, которую в последние десятилетия исследователи пытаются повысить за счет использования различных термомеханических обработок, создания новых материалов, модификации структуры известных сплавов и т.д. Улучшение функциональности рабочих элементов с памятью формы напрямую связано с повышением величин однократной и обратимой памяти формы, что может позволить при тех же параметрах формовосстановления использовать рабочий элемент с меньшими размерами, уменьшить массогабаритные характеристики всего устройства, повысить его функциональность. В начале 2000-х были получены результаты, показывающие что высокая скорость деформирования сжатием может положительно влиять на эффекты однократной и обратимой памяти формы в сплаве TiNi [1,2], но дальнейшего полноценного развития это исследование не получило. Другой аспект обеспечения функциональности материалов с ЭПФ – это гарантия надежности и стабильности устройств во времени. В первую очередь вопрос долговременного хранения имеет большое значение для рабочих элементов, задействованных в космической технике, поскольку устройство может не использоваться десятилетия, но при необходимости обязано гарантированно срабатывать должным образом. В кругах исследователей принято полагать, что длительное хранение материалов в мартенситном состоянии не оказывает влияния на их свойства, если в материале не происходит структурных изменений, но конкретных исследований практически не проводилось. Например, в работе [3] С.Д. Прокошкин с коллективом исследовали обратимую памяти формы после длительной выдержки в 9 лет. Но работ, охватывающих промежутки времени длиной в десятилетия, и его влияние на различные свойства сплавов с памятью формы в литературе нет. Функциональность рабочих элементов заключается и в способности совершить определенное действие в заданном интервале температур, например, для термочувствительных устройств. Несмотря на обилие статей по применению сплавов с ЭПФ, невозможно найти работу, содержащую полную методику, обеспечивающую функциональность термочувствительного

рабочего элемента в заданном интервале температур, последовательно описывающую принципы выбора параметров рабочего элемента, сплава, его термообработки, подбор характера термомеханической обработки сплава для обеспечения заданных деформационно-силовых параметров рабочего хода.

В связи с вышесказанным, **целью настоящей работы** являлось исследование влияния временных и температурных факторов на функциональность различных рабочих элементов из сплавов с эффектом памяти формы – выяснение возможности повышения однократной и обратимой памяти формы за счет увеличения скорости предварительного деформирования, изучение зависимости их функциональных свойств от времени функционирования или хранения в деформированном мартенситном состоянии, компьютерное моделирование влияния времени хранения сплавов с ЭПФ на однократную и обратимую память формы, создание комплексной последовательной методики обеспечения функциональности термочувствительного рабочего элемента силового привода.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать особенности проявления эффектов памяти формы в эквиатомном сплаве TiNi после высокоскоростного и квазистатического сжатия при различных температурах, захватывающих диапазон обратимого мартенситного превращения.
2. Исследовать изменение реактивных напряжений в сплавах TiNiFe и CuZnAl от времени их функционирования в термомеханических соединениях.
3. Изучить влияние длительной выдержки в деформированном мартенситном состоянии на эффекты памяти формы в сплавах на основе TiNi.
4. Выполнить компьютерное моделирование изменения функциональных свойств сплавов с эффектом памяти формы за время длительного хранения в деформированном мартенситном состоянии.
5. Разработать комплексную последовательную методику создания термочувствительного рабочего элемента с памятью формы, обеспечивающую его функциональность в заданном диапазоне температур.

Научная новизна

Исследование показало, что обратимые (фазовые) и необратимые (дислокационные) каналы деформирования эквиатомного сплава TiNi чувствительны ко времени сжатия и температуре нагружения. Обнаружено, что высокоскоростное сжатие может приводить к увеличению эффектов однократной и обратимой памяти формы. Так величина эффекта памяти формы и эффекта обратимой памяти формы мартенситного типа в результате высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C больше, чем после

квазистатического сжатия. Однако, величины эффектов однократной и обратимой памяти формы мартенситного типа, после высокоскоростного сжатия, с ростом температуры деформирования уменьшаются быстрее. Обратимая память формы аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия. Также в работе приведено сравнение между испытаниями на растяжение и сжатие, где показано, что обратимая память формы аустенитного типа в испытаниях на сжатие проявляется при более низких температурах испытания, чем после растяжения. В работе впервые были исследованы величины реактивных напряжений, ЭПФ и ОПФ, сформированные в образцах десятилетия назад. Показано, что реактивные напряжения в муфтах из сплава TiNiFe за 30 лет релаксируют не более, чем на 8%. В сплаве CuZnAl релаксация реактивных напряжений не отличается от той, которая наблюдается в других металлических материалах, и может быть описана известными способами. Экспериментально установлено, что величина ЭПФ в эквиатомном сплаве TiNi не изменяется за 25 лет хранения в деформированном мартенситном состоянии. Обнаружено, что ОПФ после длительного хранения увеличивается. Аналогов таким данным в мировой научной литературе нет. Для описания влияния длительной выдержки на эффекты однократной и обратимой памяти формы была применена модифицированная микроструктурная модель, развиваемая А.Е. Волковым, М.Е. Евард и Ф.С. Беляевым. Результаты расчетов показали хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. В работе впервые представлена комплексная методика создания термочувствительного рабочего элемента с памятью формы, обеспечивающая его функциональность в заданном диапазоне температур.

Практическая значимость

Данные о функциональных свойствах сплава TiNi при высокоскоростном и квазистатическом сжатии позволят инженерам выбирать подходящий режим предварительного деформирования при изготовлении устройств на основе сплавов с ЭПФ. Для устройств же, в основе которых лежит использование сплава TiNi и эффектов однократной, обратимой памяти формы или генерации реактивных напряжений показана гарантия работоспособности в течение более 20 лет. Инженеры могут использовать этот факт при разработке новых устройств, что особенно актуально для космической техники, где стандартная гарантия составляет порядка 20 лет. Методика исследования сплава для создания термочувствительного рабочего элемента может быть использована на практике, в том числе для других рабочих элементов с памятью формы.

Степень достоверности результатов обеспечена использованием современных экспериментальных методик, использованием современной техники, тщательной обработкой полученных экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов и полным соответствием полученных

закономерностей их теоретической интерпретации. Все результаты и выводы не противоречат современным научным представлениям и апробированы на симпозиумах, конференциях и при личном общении с авторитетными представителями научного сообщества.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Закономерности изменения эффектов однократной и обратимой памяти формы после высокоскоростного и квазистатического сжатия эквиатомного сплава в интервале температур 20-300°C.
2. Зависимости реактивных напряжений в сплавах TiNiFe и CuZnAl от времени их длительного функционирования в термомеханических соединениях.
3. Закономерности изменения эффектов однократной и обратимой памяти формы в сплавах на основе TiNi после длительного хранения в деформированном мартенситном состоянии.
4. Результаты компьютерного моделирования однократной и обратимой памяти формы эквиатомного сплава TiNi после длительного хранения в деформированном мартенситном состоянии.
5. Методика создания термочувствительного рабочего элемента с памятью формы, обеспечивающая его функциональность в заданном диапазоне температур.

Апробация диссертации

Результаты данной работы были представлены на конференциях и симпозиумах: «European Symposium on Martensitic Transformations» (ESOMAT-2015), г. Антверпен, Бельгия, сентябрь 2015 г.; Всероссийская конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» посвященная 95-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова, г. Москва, Россия, декабрь 2015 г.; «XXII Петербургские чтения по проблемам прочности», Санкт-Петербург, Россия, апрель 2016 г.; «XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики», г. Казань, Россия, август 2015 г.; Вторая международная научная конференция “Сплавы с эффектом памяти формы” к 85-летию со дня рождения В. А. Лихачева, Санкт-Петербург, Россия, сентябрь 2016 г.; Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», г. Витебск, Беларусь, май 2017 г.; XXVII Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» (МКМ 2017), г. Санкт-Петербург, Россия, сентябрь 2017 г.; Международная конференция по механике «VIII Поляховские чтения», Санкт-Петербург, Россия, февраль 2018 г.; Выступление с докладом в Доме ученых им. М. Горького РАН, Санкт-Петербург, Россия, март 2018 г.

Результаты работы вошли в отчеты по следующим научно-исследовательским проектам:

1. НИР «Эффекты памяти формы в никелиде титана после динамического нагружения» (2012-2014), СПбГУ, Мероприятие 2, грант № 6.38.74.2012 (2012-2014).
2. «Исследование термомеханических свойств сплава TiNi при высокоскоростном нагружении», грант РФФИ 13-01-00050 (2013-2015).
3. «Экспериментальное обеспечение работоспособности, надежности и живучести космической техники с элементами из сплавов TiNi с эффектом памяти формы», грант РФФИ 16-08-00135 (2016-2017)

Публикации

По материалам исследований опубликовано 10 работ, из которых 5 реферируются в РИНЦ, 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, и индексируются в Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора

Результаты исследований отражены в работах 1-10, в которых соискатель выполнил основную часть экспериментов, обработал данные, полученные в результате экспериментов и проанализировал их. В рамках модифицированного микроструктурного подхода осуществил подбор материальных констант и провел компьютерное моделирование изменения эффектов однократной и обратимой памяти формы с течением времени. Соискатель участвовал в обсуждении всех полученных данных и результатов расчетов, подготовил публикации и доклады на конференциях. В работах 1,10 А.М. Брагов, А.Ю. Константинов и А.К. Ломунов организовали проведение испытаний на высокоскоростное деформирование образцов по методу Кольского для разрезного стержня Гопкинсона. А.Х. Галиева, В.И. Григорьева в 1 помогали в обработке экспериментальных данных. В работе 6 М.Е. Евард помогала при расчете изменения реактивных напряжений в муфтах TiNiCu во времени. В работе 9 А.Е. Волков и М.Е. Евард содействовали при моделировании изменения эффектов однократной и обратимой памяти формы с течением времени в рамках микроструктурной модели. Научный руководитель А.И.Разов определил задачи исследования, участвовал в обсуждении полученных данных и подготовке публикаций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 84 наименований. Работа изложена на 113 страницах, иллюстрирована 74 рисунками и содержит 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Во Введении кратко изложено содержание работы, обоснована её актуальность, теоретическая и практическая значимость; сформулированы цель

и задачи исследования, научная новизна, методология и методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 исследованы особенности проявления эффектов памяти формы в эквИАтомном сплаве TiNi после высокоскоростного и квазистатического сжатия при различных температурах, захватывающих диапазон прямого и обратного мартенситного превращения. **Раздел 1.1** предваряет это исследование литературным обзором работ, посвященных изучению функционально-механических свойств при высокоскоростном деформировании.

В Разделе 1.2 дано описание использованных материалов и экспериментальных методик. В качестве объектов исследования служили цилиндрические образцы из сплава TiNi, близкого к эквИАтомному, высотой 4 мм и диаметром 8 мм. Образцы отжигали при 500°C в течение часа и охлаждали с печью. Характеристические температуры сплава имели следующие значения: $M_f = 32^\circ\text{C}$, $M_s = 74^\circ\text{C}$, $A_s = 74^\circ\text{C}$, $A_f = 98^\circ\text{C}$. Высокоскоростное сжатие было проведено в Научно-исследовательском институте механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского на установке, реализующей метод Кольского для разрезного стержня Гопкинсона со скоростью 10^3c^{-1} . Квазистатическое сжатие проводили на универсальной испытательной машине Instron 5985, укомплектованной термокамерой, со скоростью 10^{-3}c^{-1} . Полная деформация составляла 18-20%. Деформирование проводили в интервале температур 20–300°C, которые достигались нагревом от комнатной температуры. После деформирования образцы были дважды термоциклированы через интервалы температур прямого и обратного мартенситного превращения со скоростью порядка 2 К/мин. По полученным зависимостям деформации от температуры измеряли величины ЭПФ ϵ_{sm} при первом нагреве, и ОПФ ϵ_{twsm} при втором нагреве. Термоциклирование было проведено на оборудовании ресурсного центра «Термогравиметрические и калориметрические методы исследования» Научного парка СПбГУ.

В Разделе 1.2.1 показано влияние высокоскоростного сжатия на эффект памяти формы и приведено сравнение с аналогичными данными, полученными при исследовании влияния скорости предварительного *растяжения* на функциональные свойства эквИАтомного сплава TiNi, отраженными в работе А.С. Моторина [4] (рисунок 1). Для избавления от имеющегося, хоть и небольшого, разброса остаточных деформаций при анализе зависимостей величины ЭПФ от температуры испытания был использован коэффициент возврата деформации $\epsilon_{sm}/\epsilon_{res}$, где ϵ_{sm} – деформация восстановления формы, связанная с ЭПФ, ϵ_{res} – остаточная деформация.

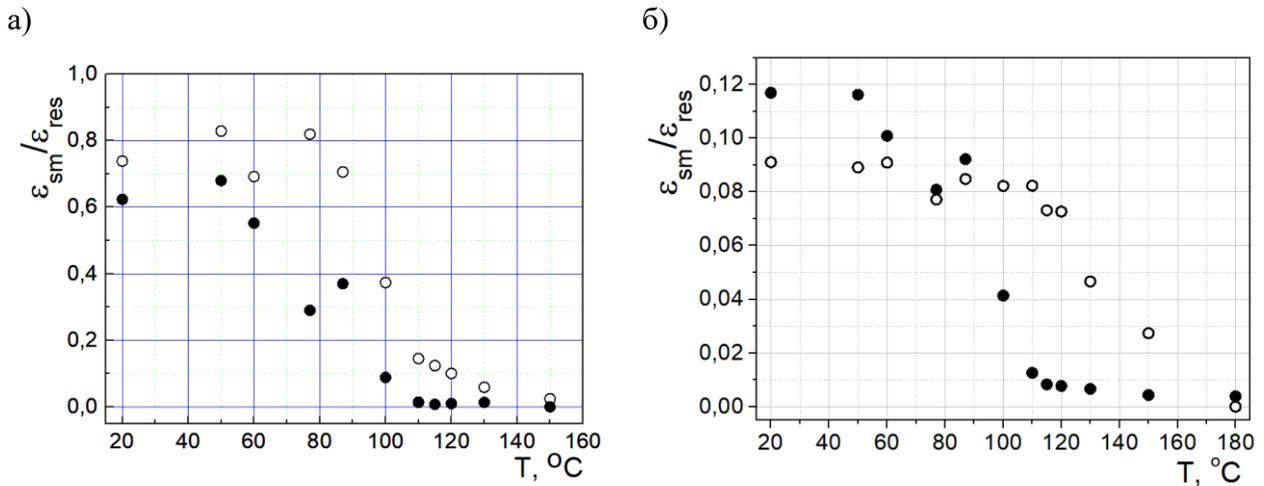


Рис.1. Зависимость отношения $\varepsilon_{sm}/\varepsilon_{res}$ от температуры предварительного деформирования (а) растяжением [4], (б) сжатием
 ○ – квазистатическое; ● – высокоскоростное деформирование.

В Разделе 1.2.2 показано влияние высокоскоростного сжатия на ОПФ и приведено сравнение с испытаниями на растяжение, полученными ранее в [4] (рисунок 2). В материалах с эффектом памяти формы наблюдается два типа обратимой памяти формы: мартенситного и аустенитного типа.

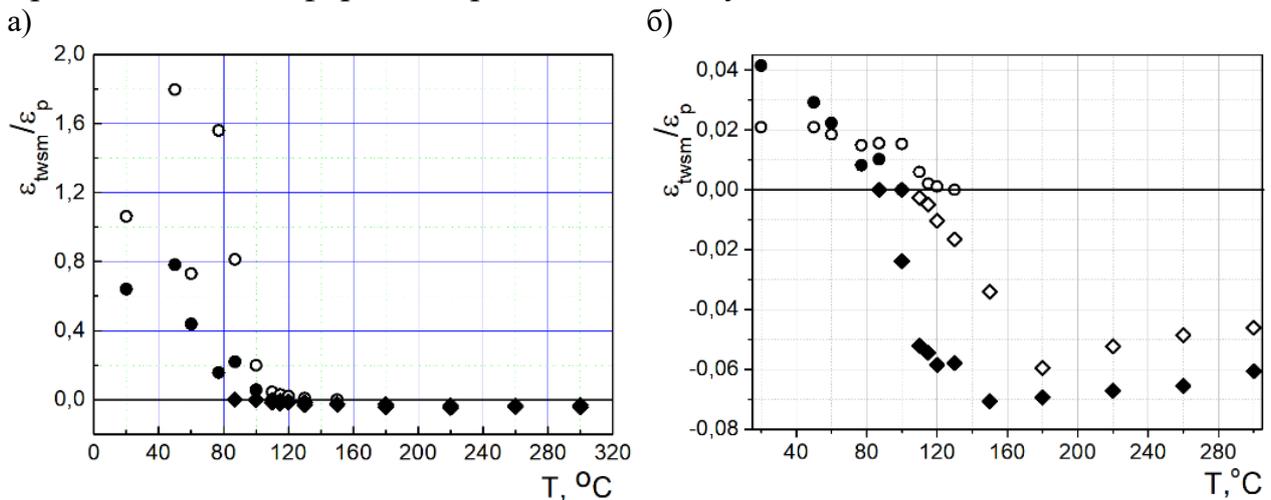


Рис.2. Зависимость отношения $\varepsilon_{twsм}/\varepsilon_p$ от температуры предварительного деформирования (а) растяжением [4], (б) сжатием.
 ○, ● – ОПФ мартенситного типа; ◇, ◆ – ОПФ аустенитного типа.
 ○, ◇ – квазистатическое; ●, ◆ – высокоскоростное деформирование.

ОПФ мартенситного типа наблюдается после деформирования сплава, находящегося в мартенситном состоянии. Первый нагрев после деформирования реализует однократный эффект памяти формы, а недовозврат свидетельствует о наличии несовместной деформации и внутренних напряжений, действие которых таково, что при охлаждении накапливается деформация, сонаправленная с предварительным деформированием, то есть изменение деформации происходит «с тем же знаком», условно «положительным». Эффект

обратимой памяти формы аустенитного типа возникает в материале, деформированном в аустенитном состоянии. При охлаждении через интервал прямого мартенситного превращения деформации изменяется разнонаправленно с предварительным деформированием, то есть изменение деформации происходит «с противоположным знаком», условно «отрицательным». Для избавления от имеющегося разброса остаточных деформаций при анализе зависимостей величины обратимой памяти формы от температуры предварительного деформирования, было использовано отношение $\varepsilon_{twsm}/\varepsilon_p$. Здесь ε_{twsm} – величина деформации за счет ОПФ, ε_p – необратимая пластическая деформация ($\varepsilon_p = \varepsilon_{res} - \varepsilon_{sm}$).

Раздел 1.3 резюмирует полученные результаты. Ранее было показано, что высокая скорость деформирования в испытаниях на *растяжение* не привела к улучшению функциональных свойств. Однако, величина эффекта памяти формы после высокоскоростного *сжатия* в интервале температур 20-60°C больше, чем после квазистатического сжатия. При температурах 60-90°C они практически равны. При более высоких температурах эффект памяти формы после квазистатического сжатия больше. Аналогично, ОПФ мартенситного типа после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C больше, чем после квазистатического сжатия. Величина обратимой памяти формы аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия. Более того, в испытаниях на сжатие величина обратимой памяти формы аустенитного типа больше, чем величина обратимой памяти формы мартенситного типа, а также больше, чем величина обратимой памяти формы аустенитного типа после растяжения. Обратимая память формы аустенитного типа после сжатия проявляется при более низких температурах испытания, чем после растяжения. Все это свидетельствует, во-первых, о различной чувствительности фазового и дислокационного каналов неупругой деформации к скорости предварительного деформирования, во-вторых о возможности улучшения функциональных свойств сплава TiNi за счет увеличения скорости предварительного деформирования сжатием.

Глава 2 содержит результаты исследования влияния времени длительного хранения сплавов с памятью формы на их функциональные свойства.

Раздел 2.1 предваряет главу литературным обзором, где показано, что исследований в этой области крайне мало.

В Разделе 2.2 приведены исследования влияния времени на реактивные напряжения. Исследования проводили на различных макетах-моделях термомеханических соединений (ТМС). Первый тип моделей описан **в Разделе 2.2.1**. Они представляли собой ТМС с муфтами различной высоты (5, 10, 35 мм) из низкотемпературного сплава TiNiFe с внутренним диаметром 19,3 мм. Муфты охлаждали в жидком азоте до 77К. После охлаждения муфты деформировали дорном, в результате чего их внутренний диаметр увеличивался до 20 мм, затем муфты надевали на сплошные стальные стержни с диаметром 19,8 мм. При

нагреве до комнатной температуры в результате эффекта памяти формы муфты плотно охватывали стержни, образуя ТМС. Соединения были собраны в 1987 году С.Р. Шиманским. Второй тип макетов ТМС описан **в Разделе 2.2.2**. Для них использовали муфты из сплава TiNiFe, собранные со сплошными цилиндрическими стержнями из различных материалов (алюминий, латунь, сталь 3, сталь 12X18H10T). Диаметр стержней – 20,4 мм. Муфты с внутренним диаметром 19,8 мм аналогичным образом дорновали при температуре 77 К до диаметра 21,15 мм и надевали на стержни. При комнатной температуре в результате ЭПФ муфты образовывали ТМС. Макеты также были собраны в 1987 году С.Р. Шиманским. Третий тип моделей ТМС описан **в Разделе 2.2.3** и представлял собой муфты разной толщины из низкотемпературного ($A_s=143\text{K}$) сплава CuZnAl, собранные со сплошными стальными цилиндрами. Исходный внутренний диаметр всех муфт составлял 13,6 мм, высота – 30 мм. Наружные диаметры муфт составляли 16,5, 17,0, 17,5, 18,0, 19,0 и 20,0 мм. Муфты деформировали дорном диаметром 14 мм в жидком азоте, затем свободно надевали на стержни диаметром 13,7 мм и нагревали до комнатной температуры. В результате ЭПФ при нагреве муфты образовывали ТМС. Соединения были собраны в 1987 году А.И. Разовым. Динамика изменения реактивных напряжений оценивалась косвенно – по усилиям, необходимым для страгивания муфт по поверхности цилиндра. В течение 30 лет периодически проводились испытания на сдвиг муфт по стержням и были измерены необходимые для этого усилия.

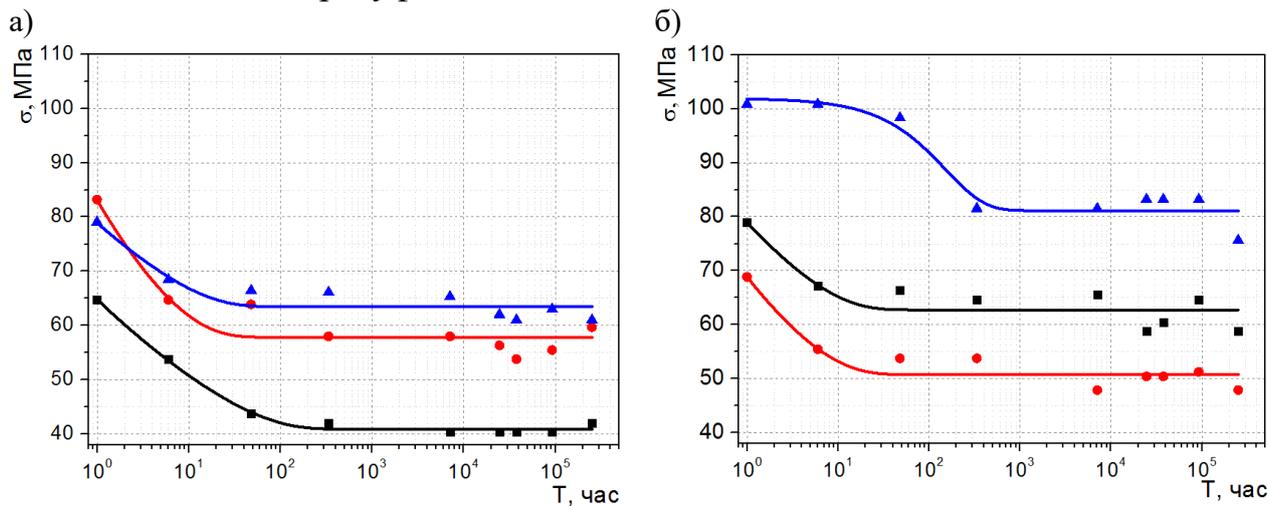
Для муфт из сплава TiNiFe было показано, что почти во всех случаях сила, необходимая для страгивания муфт по поверхности цилиндра, с течением времени растет. Так, например, в ТМС со стальным стержнем усилия, необходимые для страгивания муфты из сплава TiNiFe по поверхности цилиндра, выросли с 27800 Н до 35800 Н за 30 лет. Это говорит о том, что стержни деформируются под действием постоянных напряжений со стороны муфт, ползут. Это может быть связано с тем, что реактивные напряжения в муфтах из никелида титана слабо релаксируют, в виду того, что сплав TiNiFe в аустенитном состоянии, практически не подвержен ползучести. Чем меньше высота муфты – тем сильнее увеличение силы страгивания, поскольку в этом случае концентрация напряжений выше. Так в ТМС со стальными стержнями и муфтами из сплава TiNiFe высотой 5 мм усилия выросли в два раза за 30 лет, а при использовании муфт высотой 35 мм усилия выросли на 50% за 30 лет. Лишь в одном случае наблюдалось уменьшение силы страгивания – в макете ТМС со стержнем из нержавеющей стали 12X18H10T. Сталь 12X18H10T практически не подвержена ползучести и по всей видимости, небольшой спад усилий связан с релаксацией реактивных напряжений в муфте. Показано, что за 30 лет усилия необходимые для страгивания муфты по поверхности стержня уменьшились с 23200 Н до 21400 Н. Поскольку зависимость между усилиями страгивания и напряжениями на поверхности соприкосновения муфты и стержня линейна,

можно утверждать, что релаксация реактивных напряжений в никелиде титана составляет не более 8% за 30 лет.

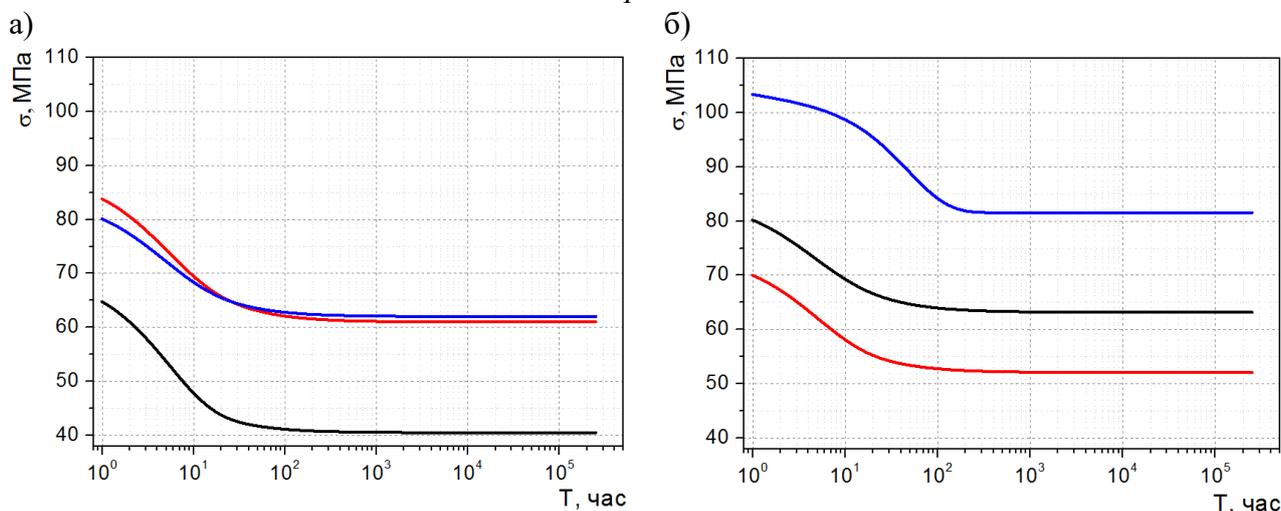
В муфтах из сплава CuZnAl наблюдалась явная релаксация напряжений в течение всего процесса длительного хранения (рисунок 3) и была предпринята попытка теоретически описать этот процесс. Начальные напряжения были вычислены по формуле для соединений с натягом:

$$p = \sigma_0 = \frac{\delta}{\frac{2r}{E_1}(1-\mu_1) + \frac{2r}{E_2}\left(\frac{R^2}{R^2-r^2} + \mu_2\right)}, \text{ где } \delta - \text{натяг (в нашем случае - 0,1 мм), } E_1, \mu_1, E_2,$$

μ_2 – модули юнга и коэффициенты Пуассона стержня и муфты соответственно, R – внешний диаметр муфты.



Эксперимент



Теория

Рис. 3. Зависимость напряжения на контактной поверхности муфты из CuZnAl и стального стержня от времени.

Внешний диаметр муфт:

а) 16,5 (■), 17 (●) и 17,5 мм (▲), б) 18 (■), 19 (●) и 20 мм (▲).

Изменение реактивных напряжений во времени было описано в рамках предположений И.А. Одингга [5]. Общая формула имеет вид: $\sigma = \sigma_1 - (\sigma' - \sigma_2)$, где $\sigma_1 = \sigma_0 e^{-kt/1+pt}$ – напряжения первого этапа релаксации, вызванной

диффузионными межзеренными процессами, $\sigma_2 = \sigma_f + (\sigma_0 - \sigma_f) \sigma' / \sigma_0 e^{-t/t_0}$ – напряжения на втором этапе релаксации, вызванной внутрезеренными процессами, где σ_0 – начальное напряжение, σ_f – предел релаксации (в теории Максвелла считается $\sigma_f = 0$), t_0 – время второго этапа, σ' – напряжение в начале второго этапа релаксации, k, p – коэффициенты, которые выбираются в зависимости от материала и условий процесса релаксации. Видно, что экспериментальные и теоретические кривые с достаточной степенью точности совпадают (рисунок 3).

В Разделе 2.3 показано влияние времени на ЭПФ на примере образцов – свидетелей реальных приводов для рычажного устройства фермы «Рапана», изготовленных в 1992 году. Приводы представляли собой проволоку из сплава TiNi диаметром 2 мм, длиной около 2 м с характеристическими температурами $M_f=34^\circ\text{C}$, $M_s=66^\circ\text{C}$, $A_s=81^\circ\text{C}$, $A_f=94^\circ\text{C}$. Приводы претерпели термомеханическую обработку, которая заключалась в охлаждении под напряжением 290 МПа и нагреве под напряжением 25 МПа в течение 6 циклов, седьмой цикл охлаждения – взведение образца, а седьмой цикл нагрева – рабочий ход. Ферма с рычажными устройствами с ЭПФ-приводами была установлена в 1993 году на станции «МИР». Образцы-свидетели, претерпевшие такую же термомеханическую обработку, хранились в мартенситном состоянии с 1992 года. В 2016 году в 5 образцах свидетелях был реализован 7-й цикл нагрева, то есть почти 25 лет спустя после изготовления. На рисунке 4 показаны зависимости величин эффекта пластичности превращения и эффекта памяти формы от номера цикла. Почти 25 лет спустя величина эффекта памяти формы в образцах-свидетелях из эквиатомного сплава TiNi никак не деградировала.

В Разделе 2.4 показано влияние времени на обратимую память формы на примере двух типов образцов, описанных **в Разделах 2.4.1 и 2.4.2**. В качестве первого типа образцов были выбраны кольцевые образцы из сплава TiNiCu с характеристическими температурами $M_s=65^\circ\text{C}$, $M_f=55^\circ\text{C}$, $A_s=87^\circ\text{C}$, $A_f=98^\circ\text{C}$. Деформирование образцов производилось дорнованием с помощью бойка диаметром $d=24,4$ мм при комнатной температуре. Кольца были деформированы в 1987 году А.И. Разовым. После деформирования было проведено шесть циклов нагрева и охлаждения через интервалы температур прямого и обратного мартенситного превращения. Первый термоцикл реализовал эффект памяти формы. Последующие пять термоциклов пришлось на реализацию эффекта обратимой памяти формы. В

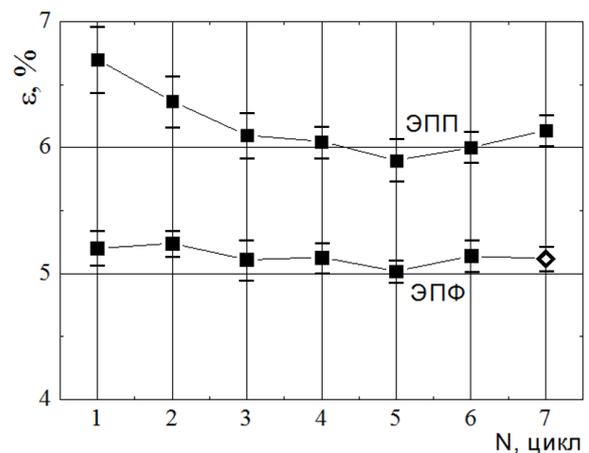


Рис.4. Зависимости величин эффекта пластичности превращения и памяти формы от номера термоцикла
 ■ - 1992 год, ◊ - 2016 год.

2016 году было проведено аналогичное термоциклирование в том же самом интервале температур.

На рисунке 5 приведена зависимость величины обратимой памяти формы от номера цикла в кольцах TiNiCu. После длительного вылеживания наблюдается особенность: в первом цикле после хранения величина эффекта обратимой памяти формы увеличивается примерно на 10%. Последующее

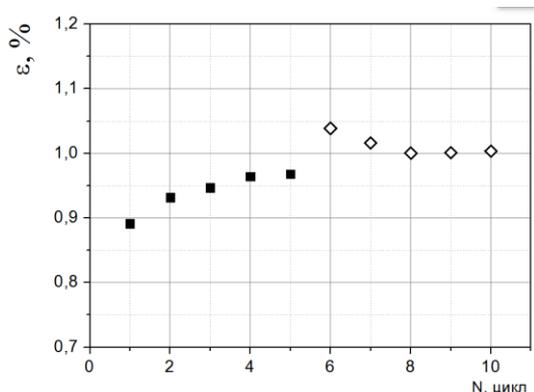


Рис.5. Зависимость величины эффекта обратимой памяти формы в кольцевых образцах из сплава TiNiCu от номера цикла.

■ - 1987 год, ◇ - 2016 год.

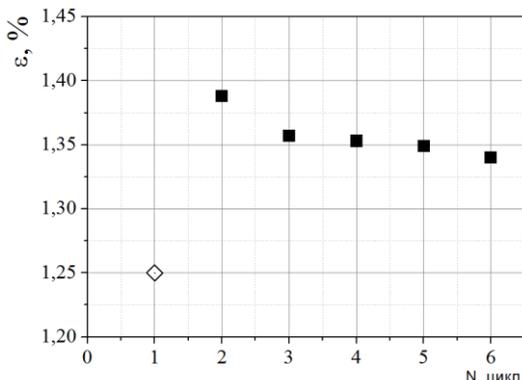


Рис.6. Зависимости величины обратимой памяти формы в сплаве TiNi от номера цикла.

Нагрев до 150°C.

◇ – 1999 год, ■ – 2016 год.

термоциклирование уменьшает величину ОПФ, однако она все равно остается несколько больше, чем перед долговременным хранением образцов в деформированном мартенситном состоянии.

Второй тип образцов, описанный в **Разделе 2.4.2** представлял из себя цилиндрические образцы из сплава TiNi высотой и диаметром 5 мм. Цилиндры были отожжены при температуре 500°C в течение часа и деформированы сжатием при комнатной температуре в 1999 году. После деформирования образцы были дважды термоциклированы, таким образом, в образцах был реализован эффект памяти формы и один цикл обратимой памяти формы. Спустя 17 лет, в 2016 году, половина образцов в количестве 4-х штук была подвергнута серии термоциклов в аналогичном 1999-му году интервале температур прямого и обратного мартенситного превращения (рисунок 6). Испытания показали, что в первом цикле после длительного хранения образцов в мартенситном состоянии наблюдается увеличение эффекта обратимой памяти формы. Последующие термоциклы приводят к небольшому снижению величины ОПФ, но она все равно остается

существенно больше, чем до длительного хранения. Вторая половина образцов была термоциклирована в более широком интервале температур (рисунок 7). Точно так же в первом цикле после длительного хранения наблюдается увеличение эффекта обратимой памяти формы. Последующее термоциклирование приводит к сильному уменьшению величины ОПФ: нагрев до более высоких температур при термоциклировании приводит к релаксации

внутренних напряжений, которые инициируют рост ориентированных кристаллов мартенсита на этапе охлаждения. Чем меньше внутренние напряжения – тем меньшая доля ориентированных кристаллов зарождается на этапе охлаждения, что приводит к менее выраженному формовосстановлению при последующем нагреве.

В Разделе 2.5 содержатся выводы по главе. Показано, что релаксация реактивных напряжений в муфтах из сплава TiNiFe крайне мала и составляет не более 8% за 30 лет. Реактивные напряжения в муфтах из сплава CuZnAl естественным образом релаксируют, а процесс релаксации может быть теоретически описан в рамках гипотез И.А. Одингга.

Экспериментально установлено, что эффект памяти формы величиной в 5% в сплаве TiNi эквиатного состава с достаточной степенью точности не изменяется за время хранения в мартенситном состоянии в течение 25-ти лет. Обнаружена особенность поведения ОПФ в сплавах на основе TiNi, заключающаяся в увеличении ОПФ после длительного хранения в мартенситном состоянии. Единственное, что может происходить в материале с течением времени, если в нем не происходит структурных изменений, связанных с превращением – это релаксация внутренних напряжений. В таком случае увеличение ОПФ со временем можно объяснить релаксацией внутренних напряжений, которые противодействовали возврату деформации во время протекания обратного превращения.

В Главе 3 выполнено компьютерное моделирование влияния времени длительного хранения на эффекты памяти в сплаве TiNi. Для теоретического моделирования была выбрана микроструктурная модель, основанная на структурно-аналитической теории прочности [6-10]. **В Разделе 3.1** приведена формулировка и основные положения использованной модели. Ключевой момент в том, что прежде в рамках модели предлагалось наличие двух видов дефектов: рассеянных и ориентированных, связанных с ростом микропластической деформации. Микропластическая деформация реализуется через образование и движение дефектов, создающих ориентированные дальнедействующие поля напряжений. Такие дефекты и называют «ориентированными». Предполагается, что каждому n-му варианту мартенсита можно сопоставить плотность ориентированных дефектов (b_n), образовавшихся при росте n-го варианта мартенсита. Кроме того, при деформации образуются еще и рассеянные дефекты (f_n), которые не создают ориентированных дальнедействующих полей напряжений, но связаны с изотропным упрочнением

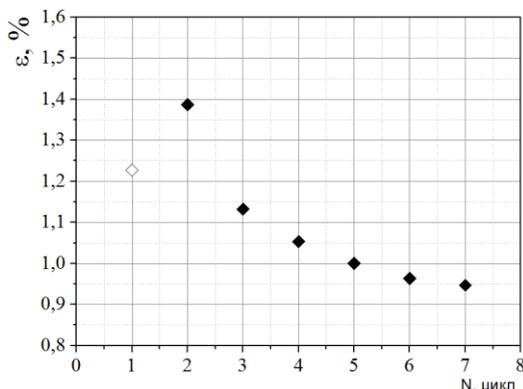


Рис. 7. Зависимость величины обратимой памяти формы в сплаве TiNi от номера цикла. Нагрев до 230°C. \diamond – 1999 год, \blacksquare – 2016 год.

материала. Для учета фактора времени в эволюционные уравнения плотностей дефектов были введены дополнительные слагаемые, которые установили скорость изменения плотностей дефектов в зависимости от энергии активации процесса, температуры и времени выдержки при этой температуре:

$$\begin{aligned} \dot{b}_n &= \dot{\varepsilon}_n^p - \frac{|b_n|}{\beta^*} \dot{\varepsilon}_n^p H(b_n \dot{\varepsilon}_n^p) + r_b(T) \left| \frac{F_n^p}{\mu} \right| \text{sign}(F_n^p); \\ \dot{f}_n &= |\dot{\varepsilon}_n^p| - r_f(T)(f_n - f_0), \end{aligned}$$

где $\dot{\varepsilon}_n^p$ – мера микропластической деформации, возникающей с ростом n-го варианта мартенсита, H – функция Хевисайда, β^* – постоянная материала, которая определяет максимальную плотность ориентированных дефектов. В введенных слагаемых: F_n^p – обобщенная термодинамическая сила, связанная с ростом ориентированных дефектов (определяется из потенциала Гиббса как частная производная по плотности ориентированных дефектов), μ – константа материала, f_0 – начальная плотность рассеянных дефектов; функции $r_b(T)$, $r_f(T)$ определяют скорость изменения ориентированных и рассеянных дефектов в зависимости от температуры и принимаются в виде:

$$\begin{aligned} r_b(T) &= r_b e^{-\frac{U_b}{kT}} \\ r_f(T) &= r_f e^{-\frac{U_f}{kT}}, \end{aligned}$$

где r_b, r_f – масштабирующие коэффициенты, U_b, U_f – энергия активации отжига, k – постоянная Больцмана. Вклад этих слагаемых варьируется посредством изменения входящих в них параметров: масштабирующих коэффициентов и энергии активации процесса для обоих типов дефектов, которые были определены в рамках этой работы.

В Разделе 3.2 приведены материальные константы (основная часть материальных констант определена ранее, при моделировании других процессов в сплаве TiNi [7-10]), использованные в модели и результаты моделирования однократной и обратимой памяти формы без выдержки и с длительной выдержкой материала в деформированном мартенситном состоянии в течение $6 \cdot 10^8$ секунд (что составляет порядка 19-ти лет) после различных вариантов предварительного деформирования. В разделе показаны результаты моделирования: ЭПФ, инициированного эффектом пластичности превращения (аналогично эксперименту в разделе 2.3.) с выдержкой после ЭПП и без (модель не показала различий в величине ЭПФ с выдержкой и без выдержки, как и в эксперименте); ЭПФ, инициированного предварительным активным деформированием в мартенситном состоянии с выдержкой после деформирования и без (модель показала увеличение эффекта памяти формы, инициированного предварительным активным деформированием после длительной выдержки); ОПФ, реализованной после эффекта пластичности превращения с выдержкой и без (рисунок 8); ОПФ, реализованной после активного деформирования в мартенситном состоянии (аналогично

эксперименту в разделе 2.4.2.) с выдержкой после деформирования и без (рисунок 9).

В Разделе 3.3

приведено обсуждение результатов. Варьируя введенные коэффициенты и задав правильные параметры упрочнения, мы получили перераспределение плотностей дефектов во времени, которое, по всей видимости, сопровождается релаксацией внутренних напряжений, таким образом, что однократная память формы, инициированная предварительным эффектом пластичности превращения, при длительной выдержке не изменяется, а обратимая память формы увеличивается. Можно сделать вывод, что микроструктурная модель является адекватным инструментом для

описания влияния долговременного хранения сплавов с памятью формы на последующее проявление ЭПФ и ОПФ. Результаты моделирования как качественно, так и количественно хорошо соотносятся с имеющимися экспериментальными данными. Особенно это касается увеличения эффекта обратимой памяти формы после длительной выдержки после накопления предварительной деформации в результате реализации эффекта пластичности превращения (рисунок 8), поскольку причиной возникновения обратимой памяти формы являются внутренние напряжения как результат несовместной деформации при мартенситном превращении, значит способ накопления предварительной деформации не имеет значения. Что касается увеличения эффекта памяти формы, инициированного предварительным активным

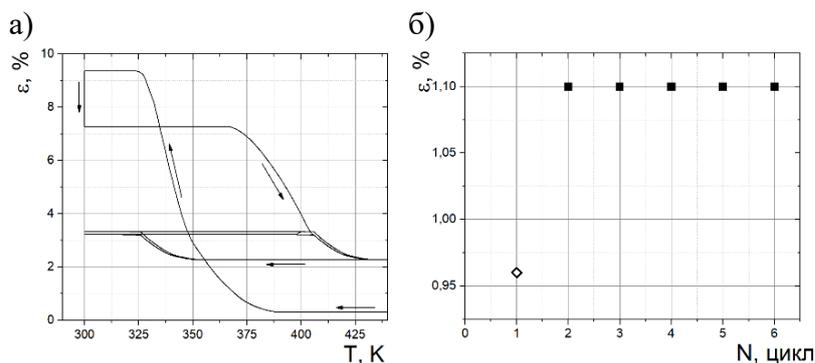


Рис.8. ОПФ в модельном материале, реализованная после эффекта пластичности превращения.

- а) Полная последовательность испытания.
 б) зависимость величины ОПФ от номера цикла.
 ◇ – до выдержки, ■ – после выдержки.

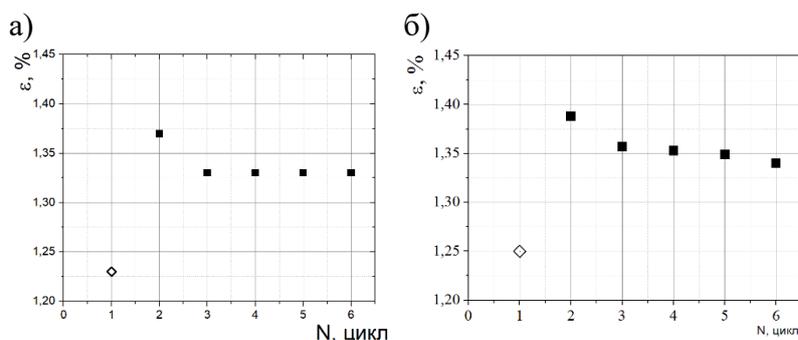


Рис.9. Зависимость ОПФ от номера цикла после предварительного активного деформирования в мартенситном состоянии.

- а) теоретическая модель; б) эксперимент
 ◇ – до выдержки, ■ – после выдержки.

деформированием в мартенситном состоянии, после длительной выдержки – гипотеза требует экспериментального подтверждения.

В Главе 4 описана методика создания термочувствительного рабочего элемента с памятью формы, обеспечивающая его функциональность в заданном диапазоне температур. Глава предваряется литературным обзором возможных применений сплавов с памятью **в Разделе 4.1**. На основании обзора сделан вывод о широте использования и отсутствии полного описания процесса подготовки материала для использования в термочувствительных устройствах, обеспечивающего его срабатывание в заданном интервале температур.

В Разделе 4.2 приведена методика создания привода и пример использования методики при изготовлении реального проволочного привода для термочувствительного устройства.

Опыт разработки различных рабочих элементов с памятью формы показывает, что методика создания термочувствительного привода должна состоять из следующих последовательных действий.

1. Расчет деформационно-силовых параметров рабочего элемента с памятью формы на основании исходных данных.
2. Расчет температурных параметров, предъявляемых к материалу рабочего элемента, обеспечивающих его функциональность в заданном диапазоне температур.
3. Выбор материала с эффектом памяти формы и определение его функционально-механических свойств.
4. Выбор оптимального режима термомеханической обработки рабочего элемента с памятью формы для обеспечения его функциональности в заданном диапазоне температур.
5. Термомеханическая обработка рабочего элемента и верификация его функциональности в заданном интервале температур.
6. Проверка функционирования рабочего элемента в самом устройстве или его макете.
7. Изготовление рабочего элемента и его паспортизация.

Далее в этом же разделе продемонстрирована правильность этой методики на примере расчета и изготовления термочувствительного проволочного привода для реального устройства, предназначенного для использования в системе вентиляции.

Задача состояла в создании проволочного привода для термочувствительного устройства с температурным интервалом срабатывания 100-110°C и в изготовлении партии приводов. Срабатывание устройства обеспечивается перемещением штока усилием не более 100 Н на 9 мм (рисунок 10). В процессе поэтапного решения поставленной задачи были рассчитаны минимальные геометрические параметры привода (длина и диаметр), теоретически удовлетворяющие решению задачи. С учетом деформационно-силовых параметров допустимый диаметр – не менее 1,1 мм, а

минимальная начальная длина, при которой возможно решение задачи, если допустить восстановление деформации в результате ЭПФ в 5% – 190 мм.

Расчет температурных параметров показал, что если для срабатывания устройства необходимо преодолеть усилие порядка 100 Н, а для диаметра предполагаемого привода положить величину в 1,1 мм, то за счет сдвига характеристических температур мартенситного превращения под напряжением температуры превращений сместятся на величину порядка 13°C. Далее был подобран материал с характеристическими температурами, учитывающими эффект сдвига температур при наличии внешнего усилия. Исследованы различные варианты термообработки материала и их влияние на проявление функциональных свойств. Рассмотрены различные варианты накопления предварительной деформации, и величины прикладываемых нагрузок. Исследована циклическая устойчивость эффекта памяти формы и эффекта пластичности превращения. По совокупности полученных данных был сделан вывод, что при изготовлении термочувствительного привода оптимально использовать проволоку из сплава TiNi типа TH-1 с характеристическими температурами обратного мартенситного превращения $A_s \approx 84^\circ\text{C}$, $A_f \approx 103^\circ\text{C}$, диаметром 1,1 мм. Наибольшее значение эффекта памяти формы по отношению к размерам продеформированного образца было получено в материале, претерпевшем отжиг при температуре 500°C в течение одного часа и охлаждение с печью. Показано, что для накопления предварительной деформации предпочтительнее использовать эффект пластичности превращения. Показано, что наиболее эффективная тренировка заключается в одиннадцати циклах накопления пластической деформации в результате эффекта пластичности под нагрузкой 220 МПа и десятикратной реализации эффекта памяти формы без нагрузки.

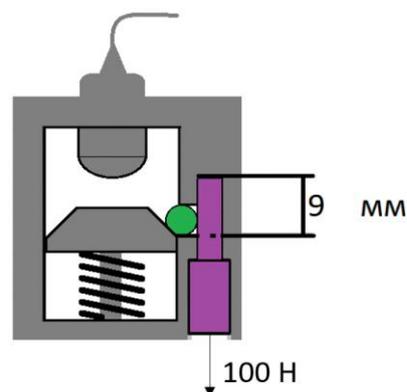


Рис.10. Схема устройства.

варианты термообработки материала и их влияние на проявление функциональных свойств. Рассмотрены различные варианты накопления предварительной деформации, и величины прикладываемых нагрузок. Исследована циклическая устойчивость эффекта памяти формы и эффекта пластичности превращения. По совокупности полученных данных был сделан вывод, что при изготовлении термочувствительного привода оптимально использовать проволоку из сплава TiNi типа TH-1 с характеристическими температурами обратного мартенситного превращения $A_s \approx 84^\circ\text{C}$, $A_f \approx 103^\circ\text{C}$, диаметром 1,1 мм. Наибольшее значение эффекта памяти формы по отношению к размерам продеформированного образца было получено в материале, претерпевшем отжиг при температуре 500°C в течение одного часа и охлаждение с печью. Показано, что для накопления предварительной деформации предпочтительнее использовать эффект пластичности превращения. Показано, что наиболее эффективная тренировка заключается в одиннадцати циклах накопления пластической деформации в результате эффекта пластичности под нагрузкой 220 МПа и десятикратной реализации эффекта памяти формы без нагрузки.

На следующем этапе для проверки правильности выбранного материала и схемы тренировки была собрана установка, имитирующая работу устройства, в которой было проведено два полноразмерных эксперимента. Один конец проволоочного привода фиксировался в неподвижном захвате, а второй – в подвижном с противодействующим усилием 100 Н. Конструкцию нагревали в термокамере универсальной испытательной машины Lloyd 30K Plus. В результате экспериментов было установлено, что при нагревании до 100°C рабочий ход приводов составил 8,3 и 8,07 мм, а при нагревании до 110°C рабочий ход приводов составил 10,41 и 10,76 мм. Таким образом, была подтверждена правильность методики создания термочувствительных приводов, которая обеспечила срабатывание устройства строго в заданном интервале температур от 100 до 110°C.

В Разделе 4.3 приведено заключение по главе. По результатам исследования была изготовлена партия приводов для термочувствительного устройства, предназначенного для использования в системе вентиляции.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что величина эффекта памяти формы после высокоскоростного сжатия до полной деформации 18-20% при скорости деформирования около 10^3с^{-1} в интервале температур 20-60°C выше, чем после квазистатического сжатия. При температурах предварительного деформирования превышающих 90°C величина эффекта памяти формы после высокоскоростного сжатия меньше и убывает быстрее с ростом температуры деформирования, чем после квазистатического деформирования.
2. Обратимая память формы с ростом температуры предварительного сжатия переходит из ОПФ мартенситного типа в ОПФ аустенитного типа. Величина эффекта обратимой памяти формы мартенситного типа после высокоскоростного сжатия в интервале температур 20-60°C выше и убывает быстрее с ростом температуры деформирования, чем после квазистатического сжатия. Величина эффекта обратимой памяти формы аустенитного типа после высокоскоростного сжатия всегда больше, чем после квазистатического сжатия.
3. Установлено, что реактивные напряжения в сплавах TiNiFe практически не релаксируют (не более чем на 8%) на протяжении 30 лет в муфтах термомеханических соединений, что обеспечивает их длительную функциональность. В сплаве CuZnAl закономерности релаксации реактивных напряжений на протяжении 30 лет не отличаются от тех, которые наблюдаются в других металлических материалах и могут быть описаны известными способами.
4. Показано, что в эквИАтомном сплаве TiNi эффект памяти формы величиной 5% практически не изменился за 25 лет хранения в деформированном мартенситном состоянии, что гарантирует сохранение способности к срабатыванию рабочих элементов на протяжении длительного времени.
5. Обнаружена особенность поведения обратимой памяти формы в сплавах TiNi и TiNiCu, заключающаяся в возрастании ее величины после длительного хранения (более 17 лет). При этом увеличение обратимой памяти формы в сплаве TiNi, инициированной предварительным высокоскоростным сжатием, более существенно, чем инициированной квазистатическим деформированием.
6. Выполненное в работе компьютерное моделирование показало, что микроструктурная модель с достаточной степенью точности описывает влияние длительной выдержки в деформированном мартенситном состоянии на эффекты памяти формы в сплаве TiNi, включая сохранение величины однократной памяти формы и повышение величины обратимой памяти формы.

7. Разработана комплексная методика создания термочувствительного рабочего элемента с памятью формы, обеспечивающая его функциональность в заданном диапазоне температур.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Bragov A., Galieva A., Grigorieva V., Danilov A., Konstantinov A., Lomunov A., Motorin A., Ostropiko E., Razov A. Functional properties of TiNi shape memory alloy after high strain rate loading // *Materials Science Forum*. 2013. V. 738-739. P. 326-331.
2. Ostropiko E., Razov A., Cherniavsky A. Investigation of TiNi shape memory alloy for thermosensitive wire drive // *MATEC Web of conferences*. 2015. V. 33. art. 03021. 4p.
3. Ostropiko E., Razov A. Influence of storage time on two-way shape memory of TiNi alloy // *Materials Today: Proceedings*. 2017. V. 4, № 3, Part B. P. 4875-4878.

Статьи в других изданиях:

4. Остропико Е.С., Чернявский А.Г. Исследование сплава TiNi для привода термочувствительного устройства // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 20-24 августа 2015г., г. Казань / Сборник трудов. Казань. 2015. С. 2876-2878.
5. Остропико Е.С., Разов А.И. Влияние фактора времени на реактивные напряжения и обратимую память формы // *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред* / Сб. матер. Всеросс. научн. конф. с междунар. участием (к 95-летию со дня рождения академика И.Ф.Образцова), 15-17 декабря 2015г., Москва. 2015. С. 236-238.
6. Евард М.Е., Остропико Е.С., Разов А.И. Изменение функциональных свойств сплавов с эффектом памяти формы во времени // XXII Петербургские чтения по проблемам прочности. К 110-летию со дня рождения академика С.Н.Журкова и 85-летию со дня рождения профессора В.А.Лихачева, 12-14 апреля 2016г., Санкт-Петербург / Сб. материалов. СПб. 2016. С. 215-217.
7. Евард М.Е., Остропико Е.С., Разов А.И. Влияние времени хранения рабочих элементов из сплавов с эффектом памяти формы на их функциональные свойства // Вторая международная научная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы», 20-23 сентября 2016г., Санкт-Петербург, Россия / Тез. докл. СПб. 2016. С. 58.
8. Остропико Е.С., Разов А.И. Влияние времени длительного хранения на эффекты однократной и обратимой памяти формы в сплавах TiNi // *Перспективные материалы и технологии: материалы междунар. симпозиума* (22-26 мая 2017г., Витебск, Беларусь). В 2-х ч. Ч.1 / Под ред. В.В.Рубаника. 2017. С. 287-289.
9. Ostropiko E.S., Evard M.E., Razov A.I. Recovery Stresses and two-way shape memory effect after long-term storage // *Mathematical and Computer Simulation in*

Mechanics of Solids and Structures – MCM 2017, September 25-27, St. Petersburg, Russia/ Abstracts. 2017. P. 156-157.

10. Остропико Е.С., Разов А.И. Влияние высокоскоростного сжатия на функциональные свойства эквиатомного сплава TiNi // Международная научная конференция по механике «Восьмые Поляховские чтения», 30 января - 2 февраля 2018г., СПб, Россия / Тез. докл. 2018. С. 222-223.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belyaev S.P., Morozov N.F., Razov A.I., Volkov A.E., Wang L., Shi S., Gan S., Chen J., Dong X. Shape Memory Effect in Titanium-Nickel after Preliminary Dynamic Deformation // Materials Science Forum. 2002. V.394-395. P.337-340.
2. Shi S.-q., Chen J.-y., Dong X.-l., Wang L.-l., Belyaev S. P., Volkov A.E., Morozov N.F., Razov A.I. Study on shape memory effect of TiNi alloy after impact deformation // Explosion and shock waves. 2001. V.21, N3. P. 168-172.
3. Хмелевская И.Ю., Лагунова М.И., Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М. Исследование обратимого эффекта запоминания формы в термически и термомеханически обработанных сплавах на основе Ti-Ni // ФММ. 1994. Т.78, Вып.1. С.83-88.
4. Моторин А.С. Функционально-механические свойства никелида титана при высокоскоростном растяжении: диссертация кандидата физико-математических наук. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 2016. 134 с.
5. Гинцбург Я.С. Релаксация напряжений в металлах. Ленинград: "Машгиз", 1957. 171 с.
6. Волков А.Е. Микроструктурное моделирование деформации сплавов при повторяющихся мартенситных превращениях // Изв. Академии Наук. Сер. Физическая. 2002. Т. 66, № 9. С. 1290-1297.
7. Волков А.Е., Евард М.Е., Бобелева О.В. Моделирование накопления дефектов и повреждаемости в процессе пластической деформации и при аккомодации мартенсита в сплавах с памятью формы // Материаловедение. 2006. № 12. С.2-6.
8. Evard M.E., Volkov A.E. Modeling of deformation defects accumulation and fracture of austenitic TiNi shape memory alloy // Proc. of The12th International Conference on Fracture 2009, ICF-12. 2009. P. 3917-3925.
9. Evard M.E., Volkov A.E. A theoretical study of the plastic deformation in titanium-nickel shape memory alloy // Proceedings of the international symposium: Shape memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Industrial Applications, edited by F. Trochu, V. Brailovski, A. Galibois, 1999, P. 177-183.
10. Evard M.E., Markachev N.A., Uspenskiy E.S., Vikulenkov A.V., Volkov A.E. Simulation of payload vibration protection by shape memory alloy parts // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. V. 23, N 7. P. 2719-2726.