

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

СИБИРЕВ Алексей Владимирович

НЕОБРАТИМАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ
МНОГОКРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ
ФОРМЫ В СПЛАВЕ TiNi

01.02.04–Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург 2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник кафедры
теории упругости СПбГУ
Беляев Сергей Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Мельников Борис Евгеньевич
(Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет,
заведующий кафедрой "Сопротивление
материалов")

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

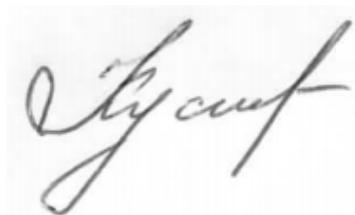
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Защита состоится 25 декабря 2014 года в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д212.232.30 при Санкт-Петербургском государственном
университете 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 [http://spbu.ru/science/disser/
soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/235](http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/235)

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Кустова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сплавы с памятью формы обладают уникальной способностью восстанавливать значительную неупругую деформацию. Благодаря этому они нашли широкое применение в космонавтике, медицине и промышленности. По условию срабатывания сплавов с памятью формы все применения можно условно разделить на две группы, к первой группе относятся устройства, в которых необходимо однократное срабатывание - это в первую очередь термомеханические муфты и различные медицинские стенты, протезы и зажимы, а также устройства расчеховки и развёртывания, используемые в космической отрасли. Ко второй группе относятся устройства многократного действия: термоприводы, двигатели и другие устройства. Для таких устройств важным параметром является способность сплава сохранять свойства при многократно повторяющихся теплосменах. Самыми распространёнными среди сплавов с памятью формы являются сплавы на основе TiNi (никелид титана). Они обладают уникальным набором свойств - высокими значениями восстанавливаемой деформации и развиваемых усилий, высокой прочностью и пластичностью, высокой коррозионной стойкостью, благодаря чему широко применяются во многих отраслях промышленности и медицине. Для многих применений часто необходимо, чтобы температуры мартенситных превращений сплава были выше комнатных. Такие характеристические температуры мартенситных переходов наблюдаются в сплаве TiNi состава, близкого к эквиатомному. Вместе с тем, эквиатомный сплав TiNi не проявляет хорошей термостабильности функциональных свойств. Большое количество экспериментальных данных показывает, что при многократных теплосменах в сплавах на основе TiNi наблюдается изменение параметров эффектов памяти формы, температур их проявления, может изменяться стадийность превращений [1], а также наблюдается накопление необратимой деформации [2]. Эти изменения нежелательны, так как приводят к изменению геометрических и силовых характеристик рабочего тела устройства и, следовательно, снижают его эксплуатационный ресурс. Поэтому актуальной является задача разработки методов повышения стабильности свойств сплавов TiNi, близких к эквиатомному составу. Для успешной разработки этих методов необходимо иметь представления о механизмах накопления необратимой деформации при термоциклировании. Исследованию этого вопроса посвящено некоторое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Однако, результаты этих работ часто находятся в противоречии друг с другом. Так в [2] полагают, что необратимая деформация накапливается при охлаждении во время прямого мартенситного превращения, с другой стороны в [3] показано, что необратимая деформация накапливается во время нагревания на стадии обратного мартенситного превращения. Такое противоречие может быть обусловлено, как различием объектов исследования (химического состава сплавов и их термообработки), так и различием методов исследования стабильности функциональных свойств сплавов с памятью формы. Кроме того,

другим важным фактором является величина действующего напряжения во время термоциклирования. Известно, что стабильность функциональных свойств зависит от того, как величина напряжения, действующего при термоциклировании, соотносится с пределом переориентации мартенситной фазы [2]. Так, если действующее напряжение меньше предела переориентации, то величина эффектов пластичности превращения и памяти формы возрастает при увеличении числа термоциклов [2]. Если же действующее напряжение превышает предел переориентации, то величина эффекта пластичности превращения уменьшается при увеличении числа термоциклов, а величина накопленной деформации возрастает [2]. Можно предположить, что различия в функциональном поведении при термоциклировании под различной нагрузкой обусловлены различиями в механизмах накопления необратимой деформации. Однако механизмы накопления необратимой деформации при термоциклировании сплава TiNi недостаточно изучены. Существующие подходы к описанию данного процесса часто находятся в конфликте друг с другом, что не позволяет предложить адекватную модель механизма накопления необратимой деформации. Это, в свою очередь, препятствует описанию и прогнозированию изменения функциональных свойств сплавов с памятью формы при термоциклировании, что существенно сужает спектр задач, которые могут быть решены с помощью этих сплавов.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы являлось исследование особенностей накопления необратимой деформации и стабильности функциональных свойств при термоциклировании эквиатомного сплава TiNi через температурный интервал мартенситных превращений, определение физических процессов, ответственных за механическое поведение материала при теплосменах, и развитие численных методов описания и прогнозирования такого поведения. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методику исследования влияния доли температурного интервала прямого или обратного переходов на накопление необратимой деформации и стабильность функциональных свойств при термоциклировании сплавов с памятью формы.
2. Исследовать изменение параметров мартенситных превращений и изменения удельного электросопротивления при термоциклировании через температурный интервал мартенситных превращений сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ без нагрузки.
3. Исследовать особенности накопления необратимой деформации, стабильности функциональных свойств, изменения удельного электросопротивления при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ через различную долю температурного интервала прямого или обратного мартенситного превращения под напряжением.
4. Произвести расчёты для апробации модели, описывающей изменение функциональных свойств и накопления необратимой деформации при термоциклировании сплава TiNi. При необходимости модифицировать

модель с целью достижения максимального приближения расчётных результатов к экспериментальным.

Научная новизна

В диссертации получены новые знания о механизмах накопления необратимой деформации при термоциклировании $Ti_{50}Ni_{50}$ через неполный температурный интервал прямого или обратного мартенситных превращений. Показано, что необратимая деформация в основном накапливается на завершающей стадии прямого мартенситного превращения. Эта деформация обусловлена появлением при охлаждении благоприятно ориентированных кристаллов мартенсита, сдвиг которых сонаправлен с вектором действующей нагрузки. Установлено, что при термоциклировании под напряжением, превышающем критическое напряжение переориентации мартенсита, дополнительное накопление необратимой деформации происходит из-за силовой переориентации неблагоприятно ориентированных вариантов мартенсита. Обнаружено, что при нагревании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ во время обратного мартенситного превращения происходит его разупрочнение. Показано, что модифицированная модель на основе структурно-аналитической теории прочности удовлетворительно описывает процессы накопления необратимой деформации и изменения функциональных свойств при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ через различную долю температурного интервала прямого мартенситного превращения. Установлено, что модифицированная модель учитывает особенности накопления необратимой деформации на различных стадиях прямого мартенситного превращения.

Практическая значимость

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что на основе полученных знаний могут быть даны практические рекомендации инженерам, разрабатывающим устройства многократного действия на основе сплавов с памятью формы, по выбору силовых и температурных режимов работы устройства, обеспечивающих стабильность функциональных свойств сплава $TiNi$, а, следовательно, и рабочих характеристик устройства.

Степень достоверности результатов обоснована применением современных методик и оборудования, воспроизводимостью экспериментальных результатов, использованием современных методов теоретического расчёта, соответствием полученных результатов и результатов других отечественных и зарубежных исследователей. Результаты и выводы по работе находятся в согласии с современными представлениями о природе процессов неупругой деформации материалов с мартенситными переходами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика исследования изменения функциональных свойств сплавов с памятью формы при термоциклировании через различную долю температурного интервала прямого мартенситного превращения.
2. Накопление необратимой деформации при термоциклировании эквиатомного никелида титана происходит в процессе прямого мартенситного превращения вследствие пластической аккомодации

локальных напряжений при росте "благоприятно ориентированных" кристаллов мартенсита, сопровождающемся сдвигом, сонаправленным с внешней нагрузкой. Увеличение доли ориентированных вариантов мартенсита приводит к возрастанию необратимой деформации.

3. В процессе термоциклирования экваторного никелида титана на этапе нагревания через температурный интервал обратного превращения происходит разупрочнение материала, величина которого пропорциональна доле материала претерпевшего переход мартенсит → аустенит.
4. Модифицированное уравнение изменения силы микропластического течения в модели на основе структурно-аналитической теории прочности Лихачёва-Малинина, которая позволяет удовлетворительно описать накопление необратимой деформации и изменение функциональных свойств при термоциклировании сплава TiNi.

Апробация диссертации

Результаты работы были представлены на всероссийских и международных конференциях: 50-ый международный симпозиум «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 27 сентября - 1 октября 2010), Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов (Москва, 26-28 октября 2011), VI-ая Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур» (Москва, 17-19 апреля 2012), XX-ые Петербургские чтения по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 10-12 апреля 2012), European Symposium on Martensitic Transformation ESOMAT-2012 (Санкт-Петербург, 9-16 сентября, 2012), International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST-2013). Прага, май 21-24, 2013, 54-ая международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Россия, Екатеринбург, 11-15 ноября 2013, международная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы», Витебск, Беларусь, 26-30 мая, 2014, International Conference on Martensitic Transformations (ICOMAT-2014), Бильбао, Испания, июль 6-11, 2014.

Достижения соискателя:

1. Победитель конкурса грантов студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2011 и в 2013 годах.
2. Диплом за лучший стендовый доклад среди молодых учёных на научно-техническом семинаре "Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов" (Москва, 26-28 октября 2011)
3. Руководитель проекта "Несовершенство эффекта памяти формы в нагруженном сплаве TiNi как причина размерной нестабильности" в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009-2013 г.

4. Диплом за активное участие на международной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» - 2014 г.

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

1. "Разработка методов повышения функциональной и размерной стабильности термо-механических приводов с эффектом памяти формы для авиационной и космической техники" - ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009-2013 г.
2. "Производство полезной энергии в узком интервале температур сплавом TiNi с памятью формы при использовании низкокалорийных возобновляемых источников энергии"- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009-2013 г.
3. Механика перспективных массивных наноматериалов для инновационных инженерных приложений (Mechanics of Advanced Bulk Nanomaterials for Innovative Engineering Applications) (дог. № 14.B25.31.0017 от 28.06.2013) СПбГУ

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, из которых 2 в изданиях, индексируемых "Scopus".

Личный вклад автора

Результаты исследований отражены в работах 1 – 10. В работах 1 – 10 соискатель выполнил основную часть экспериментов, осуществил обработку и анализ полученных экспериментальных данных участвовал в обсуждении полученных данных и подготовке публикаций, Беляев С.П. и Реснина Н.Н. участвовали в обсуждении полученных данных и подготовке публикаций, а также определили задачи исследования. В работе 2 соискатель выполнил расчёт накопления необратимой деформации и изменения функциональных свойств с помощью модифицированной структурно-аналитической теории прочности при термоциклировании сплава Ti₅₀Ni₅₀, Волков А.Е. и Евард М.Е. оказывали консультации в проведении расчётов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, выводов и списка используемой литературы, состоящего из 116 наименований. Работа изложена на 132 страницах, иллюстрирована 68 рисунками и содержит 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Во введении кратко изложено содержание работы, обоснована её актуальность и практическая значимость; сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит аналитический обзор, в котором описано влияние теплосмен на свойства различных сплавов, основной акцент сделан на сплавы с эффектом памяти формы. Проанализированы данные об изменении функциональных свойств сплавов на основе TiNi при термоциклировании через температурный

интервал мартенситных превращений. Сделан вывод о наличии противоречий в описании механизма накопления необратимой деформации в работах разных авторов. Рассмотрены существующие методы снижения скорости накопления необратимой деформации, указаны их недостатки. Рассмотрены модели, описывающие накопление необратимой деформации при термоциклировании сплавов с памятью формы.

В главе 2 на основе выполненного аналитического обзора сформулированы основная цель и задачи исследования. Дано описание использованных материалов и экспериментальных методик. В качестве объектов исследования выбраны проволоочные образцы сплава $Ti_{50}Ni_{50}$, диаметром $d=0,5$ мм (производства МАТЕКС - СПФ), подвергнутые отжигу при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа. После указанной термообработки сплав испытывает при охлаждении прямое термоупругое мартенситное превращение из кубической B2 фазы в моноклинную B19' фазу, при температурах $M_n = 64\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_k = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, и при нагревании обратное термоупругое мартенситное превращение B19' \rightarrow B2 при температурах $A_n = 84\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_k = 98\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение кинетики мартенситных превращений при термоциклировании исследовали методом 4-х точечного измерения электросопротивления. Для того чтобы оценить изменение плотности дефектов при теплосменах, измеряли приращения удельного электросопротивления в сплаве при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерения проводили до и после термоциклирования, что позволяло вычислить относительное изменение электросопротивления, которое линейно связано с изменением плотности дефектов. Параметры (температуры и последовательность) мартенситных превращений исследовали в аппарате Mettler Toledo 822^e методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Для исследования влияния термоциклирования под напряжением в температурном интервале мартенситных превращений на функциональные свойства сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ была использована испытательная машина Lloyd 30 K Plus, оснащенная термокамерой. Для того чтобы исследовать изменения функциональных свойств сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ при термоциклировании в температурном интервале неполного прямого мартенситного превращения была разработана специальная методика. Которая заключается в следующем. По данным, полученным при термоциклировании через полный интервал мартенситного превращения, определяли величину температурного интервала прямого перехода в первом цикле $\Delta T = M_n - M_k$ и вычисляли температуры $T_{1}^{II} = M_n - \frac{3}{4}\Delta T$, $T_{2}^{II} = M_n - \frac{1}{2}\Delta T$, $T_{3}^{II} = M_n - \frac{1}{4}\Delta T$. Схема определения температур T_{1}^{II} , T_{2}^{II} , T_{3}^{II} представлена на рисунке 1. Образец сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ нагревали до температуры выше A_k , когда весь объём сплава находился в аустенитной фазе, нагружали напряжением 50 или 200 МПа, и охлаждали. По зависимости деформации от температуры in-situ определяли температуру начала прямого

превращения M_n и продолжали охлаждение до температуры T_1^P , T_2^P или T_3^P , после чего образец нагревали до температуры, превышающей A_k .

Для того чтобы исследовать изменения функциональных свойств сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ при термоциклировании в температурном интервале неполного обратного мартенситного превращения, по данным, полученным при термоциклировании через полный интервал мартенситного превращения, определяли величину температурного интервала обратного перехода $\Delta T_0 = A_k - A_n$ и вычисляли температуры $T_1^O = A_n + 1/4\Delta T_0$, $T_2^O = A_n + 1/2\Delta T_0$, $T_3^O = A_n + 3/4\Delta T_0$. Схема определения температур T_1^O , T_2^O , T_3^O представлена на рисунке 2. Образец нагревали до температуры выше A_k , когда весь объём сплава находился в аустенитной фазе, нагружали напряжением 50 или 200 МПа, затем охлаждали до температуры ниже M_k и нагревали до температуры T_1^O , T_2^O или T_3^O . Затем охлаждали до температуры ниже M_k , после чего термоциклировали в температурном интервале $(M_k - 10) \div T_i^O$.

В главе 3, состоящей из 4 разделов, представлены основные результаты работы. **Раздел 3.1** посвящён исследованию влияния термоциклирования через температурный интервал мартенситных превращений в ненапряжённом состоянии на свойства сплава $Ti_{50}Ni_{50}$. Показано, что в результате термоциклирования сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ характеристические температуры мартенситных превращений снижаются, что связано с увеличением плотности дефектов. Также меняется стадийность превращений. После 30 термоциклов часть объёма материала испытывает при охлаждении $B2 \rightarrow B19'$ переход, тогда как другая часть претерпевает цепочку превращений $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$. Причиной является неоднородное распределение дефектов кристаллической решётки, возникающих при многократно повторяющихся фазовых переходах. Отмечено, что основные изменения происходят в первых

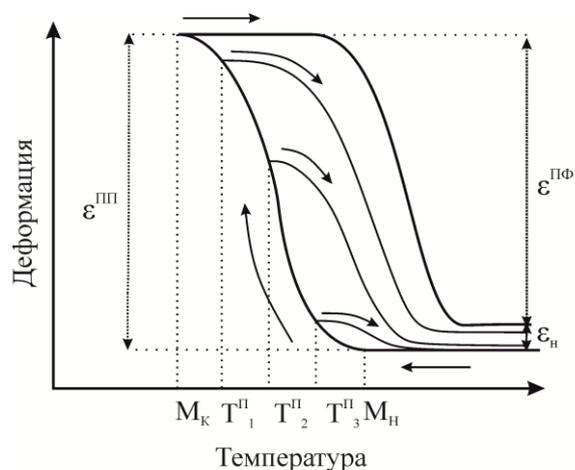


Рисунок 1 - Схема определения температур T_1^P , T_2^P , T_3^P .

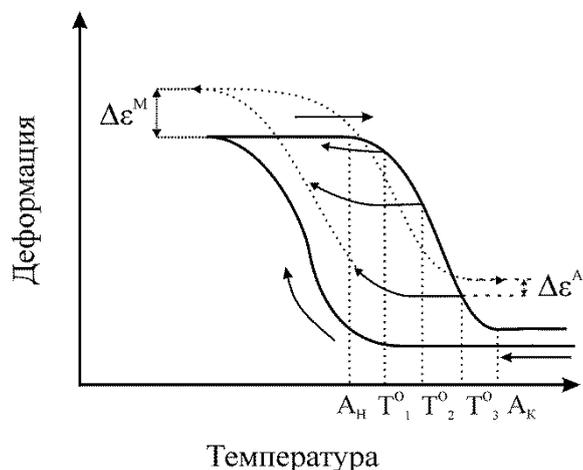


Рисунок 2. Схема определения температур T_1^O , T_2^O , T_3^O .

30 циклах, при дальнейшем термоциклировании скорость накопления плотности дефектов значительно снижается.

Раздел 3.2 разделён на четыре подраздела. В **3.2.1** приведены результаты исследования влияния термоциклирования под нагрузкой в полном температурном интервале мартенситных превращений на свойства сплава $Ti_{50}Ni_{50}$. Показано, что термоциклирование сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой приводит к накоплению необратимой деформации, изменению величин эффектов пластичности превращения - ε^{III} и памяти формы - $\varepsilon^{ПФ}$, и увеличению плотности дефектов. При

этом увеличение значения действующего напряжения с 50 МПа до 200 МПа во время термоциклирования приводит к значительному росту величины накопленной пластической деформации ε_{nl} (Рисунок 3). Так за тридцать термоциклов при значении действующего напряжения 200 МПа величина пластической деформации достигла 41%, тогда как за тридцать термоциклов при значении действующего напряжения 50 МПа в образце накопилось только 3% пластической деформации. Также увеличение действующей нагрузки приводит к качественному изменению вида зависимости $\varepsilon^{III}(N)$. Если при термоциклировании под малой нагрузкой (50 МПа) величина ε^{III} увеличивается, то при термоциклировании под действующим напряжением 200 МПа величина ε^{III} уменьшается с числом циклов. Величина эффекта памяти формы - $\varepsilon^{ПФ}$ при увеличении числа теплосмен в обоих случаях увеличивается.

Подраздел 3.2.2 посвящён исследованию влияния термоциклирования под нагрузкой в неполном температурном интервале прямого мартенситного превращения на свойства сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ (см. рисунок 1). Установлено, что снижение доли температурного интервала прямого мартенситного превращения при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под постоянным напряжением позволяет снизить величину накопленной пластической деформации (Рисунок 4) и получить более стабильные функциональные свойства материала. Измеряли изменение удельного электросопротивления в образцах сплава, подвергнутых тридцати термоциклам под постоянным напряжением 50 и 200 МПа через различную долю температурного интервала прямого мартенситного превращения - Φ . Показано, что вне зависимости от значения действующего напряжения качественный вид зависимости $\Delta\rho/\rho(\Phi)$ сохраняется (Рисунок 5).

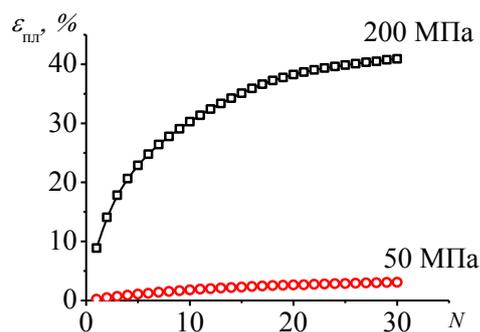


Рисунок 3. Изменение ε_{nl} при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой 50 и 200 МПа через температурный интервал мартенситных превращений.

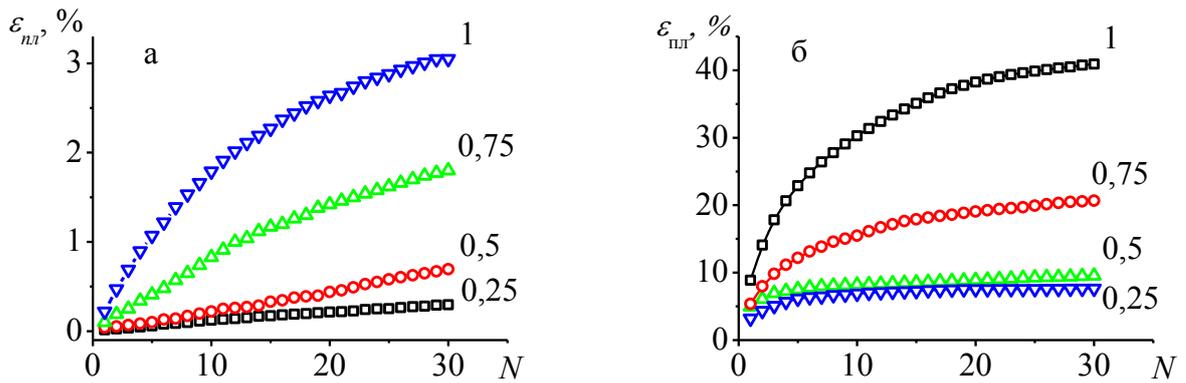


Рисунок 4. Зависимости $\varepsilon_{пл}(N)$, полученные при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой 50 МПа (а) и 200 МПа (б) через различную долю температурного интервала прямого мартенситного превращения. Цифрами у кривых указана доля температурного интервала прямого мартенситного превращения.

Установлено, что накопление необратимой деформации и увеличение плотности дефектов кристаллической решётки происходит в основном во второй половине температурного интервала прямого мартенситного превращения. Снижение доли температурного интервала прямого мартенситного превращения до 0,5 приводит к значительному снижению величин $\Delta\rho/\rho$ и $\varepsilon_{пл}$.

В подразделе 3.2.3 описаны результаты исследования влияния термоциклирования под нагрузкой в неполном температурном интервале обратного мартенситного превращения на свойства сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ (см. рисунок 2). Показано, что снижение доли температурного интервала обратного мартенситного превращения при термоциклировании под нагрузкой

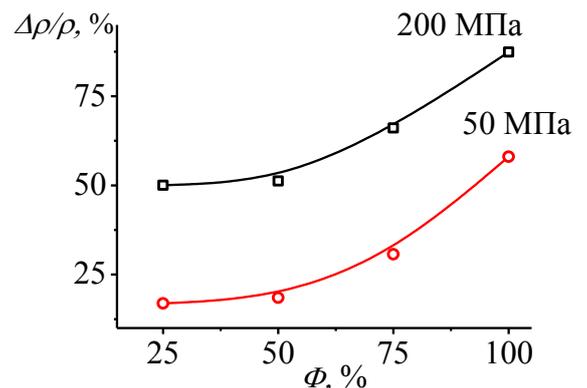


Рисунок 5. Изменение удельного электросопротивления от доли температурного интервала прямого мартенситного превращения в сплаве $Ti_{50}Ni_{50}$, подвергнутом 30 термоциклам под нагрузкой 50 МПа и 200 МПа.

приводит к снижению величин $\Delta\varepsilon^A$ (Рисунок 6а) и $\Delta\varepsilon^M$. Поскольку величина $\Delta\varepsilon^A$ связана с накоплением пластической деформации, то тот факт, что скорость изменения $\Delta\varepsilon^A$ достигает нулевого значения свидетельствует о том, что материал упрочнился настолько, что дальнейшее накопление пластической деформации оказывается невозможным. На рисунке 6б видно, что скорость изменения $\Delta\varepsilon^A$ становится равной нулю, если доля температурного интервала обратного мартенситного превращения была меньше 0,75, то есть при термоциклировании в таком режиме сплав упрочняется. Вместе с тем, на рисунке 6б видно, что если при термоциклировании доля температурного

интервала больше 0,75, то скорость изменения $\Delta\varepsilon^A$ хоть и становится постоянной, но нулю не равна, следовательно, при термоциклировании в таком режиме материал не упрочняется. В таком случае сплав оказывается упрочнённым на начальной стадии обратного перехода и неупрочнённым на завершающей стадии превращения. Значит, во время обратного перехода происходит разупрочнение.

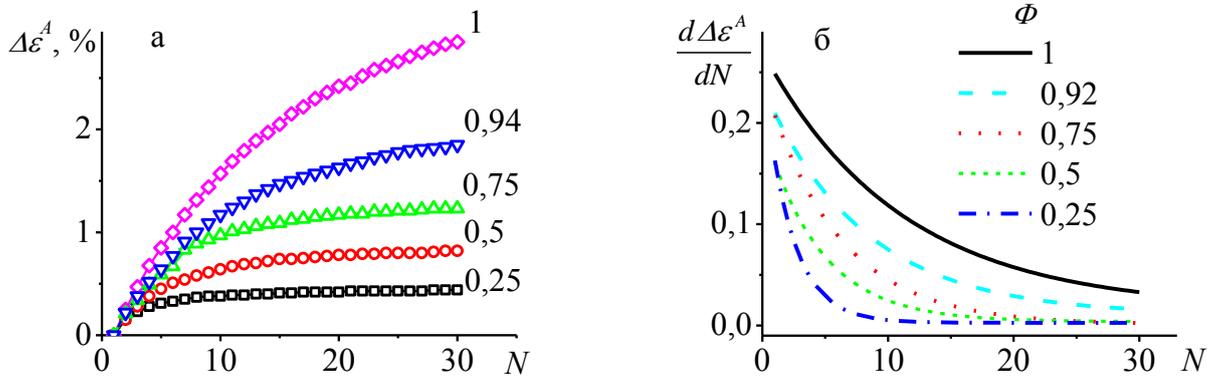


Рисунок 6. Изменение $\Delta\varepsilon^A$ (а) и скорость изменения $\Delta\varepsilon^A$ (б) при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой 50 МПа через различную долю температурного интервала обратного мартенситного превращения. Цифрами у кривых указана доля температурного интервала обратного мартенситного превращения.

В подразделе 3.2.4 приведено обсуждение результатов, описанных в разделе 3.2.1-3. На рисунке 7 в диаграммном поле по оси ординат отложена величина накопленной в сплаве $Ti_{50}Ni_{50}$ пластической деформации после 30 термоциклов под нагрузкой, а по оси абсцисс изменение удельного электросопротивления в тех же образцах. Для металлов и сплавов существует линейная зависимость между изменением удельного электросопротивления и изменением плотности дефектов [4].

Вместе с тем для сплавов с памятью формы общее изменение плотности дефектов - ΔD можно условно разделить на сумму изменения плотности дефектов, инициированных возникновением благоприятных кристаллов мартенсита - ΔD_{op} , и плотности дефектов, инициированных возникновением неблагоприятных кристаллов мартенсита - ΔD_n . При этом вклад в накопление необратимой деформации даёт только ΔD_{op} , а в изменение удельного электросопротивления - оба слагаемых.

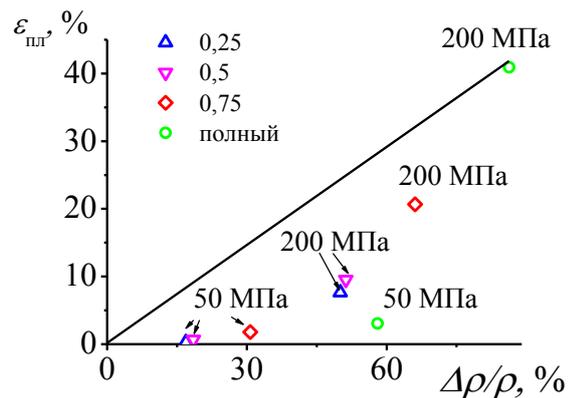


Рисунок 7. Изменение величины пластической деформации и изменение удельного электросопротивления, в сплаве $Ti_{50}Ni_{50}$ после 30 термоциклов через различную долю температурного интервала прямого мартенситного превращения под нагрузкой 50 и 200 МПа.

После 30 термоциклов через полный интервал превращений под нагрузкой 200 МПа величина обратимой деформации достигла 9,7%, что близко к значению теоретического ресурса и можно утверждать, что все кристаллы мартенсита ориентированы вдоль действующей нагрузки, и, следовательно, все дефекты, образовавшиеся во время прямого мартенситного превращения, дают вклад в накопление необратимой деформации ($\Delta D_n = 0$). На рисунке 7 проведена прямая линия, соединяющая начало координат с точкой, полученной при испытаниях в таком режиме (200 МПа, полный интервал). Если точка лежит на этой линии, это означает, что при охлаждении образуются только благоприятные варианты мартенсита и всё изменение плотности дефектов даёт вклад в пластическую деформацию, если точка лежит ниже линии, то при охлаждении образуются и неориентированные кристаллы. На рисунке 7 видно, что все точки, соответствующие термоциклированию под нагрузкой 50 МПа вне зависимости от доли температурного интервала прямого превращения лежат ниже линии, следовательно, при охлаждении образуются, как благоприятные, так и неблагоприятные варианты мартенсита. В случае термоциклирования под нагрузкой 200 МПа точка, соответствующая термоциклированию через 0,25 доли температурного интервала прямого мартенситного превращения, также лежит ниже линии. Однако, с увеличением доли температурного интервала прямого превращения расстояние от точек, соответствующих изменениям термоциклирования под нагрузкой 200 МПа, до линии уменьшается. Следовательно, возрастает доля благоприятно ориентированных кристаллов и при термоциклировании в полном цикле в образце остаются только благоприятные кристаллы мартенсита. Поскольку на начальном этапе прямого перехода возникают, как благоприятно ориентированные, так и неориентированные кристаллы, а на завершающем этапе превращения остаются только благоприятные, то следовательно на завершающем этапе охлаждения происходит силовая переориентация неориентированных кристаллов, возникших на начальном этапе превращения. При этом известно, что процесс силовой переориентации сопровождается большой пластической деформацией, что приводит к значительному приросту величины $\varepsilon_{пл}$. Таким образом, накопление необратимой деформации при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой происходит вследствие аккомодации локальных напряжений, создаваемых во время охлаждения "благоприятными" вариантами мартенсита, производящими сдвиг, сонаправленный с действующей нагрузкой. При действующем напряжении ниже предела переориентации мартенсита, благоприятные кристаллы образуются только из аустенитной фазы, если же действующее напряжение превосходит предел переориентации мартенситных вариантов, то "благоприятные" кристаллы возникают, как непосредственно из аустенитной фазы, так и за счёт силовой переориентации мартенситных

вариантов. При этом переориентация кристаллов приводит к резкому возрастанию величины необратимой деформации.

В разделе 3.4 выполнен расчёт накопления необратимой деформации при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой в полном и неполном температурном интервале прямого мартенситного превращения. Расчёт выполнен на основе Структурно-аналитической теории прочности Лихачёва - Малинина. Согласно теории, необратимая деформация возникает при достижении "силой микропластического течения" - F_n критического значения - F_n^y . При этом постулируется закон изменения F_n^y при термоциклировании: $dF_n^y = h |d\Phi_n^p| + r(F_n^y - F_0^y)H(F_n^y - F_0^y)d\Phi_n H(-d\Phi_n)$, где Φ_n^p - мера микропластической деформации, F_0^y - исходное значение F_n^y , Φ_n - объёмная доля n-го варианта мартенсита, H - функция Хэвисайда, h и r - константы. Первый член описывает упрочнение материала при охлаждении, а второй - его разупрочнение в процессе обратного мартенситного превращения, причём уменьшение F_n^y , предполагается пропорциональным упрочнению $(F_n^y - F_0^y)$. Коэффициенты определяющего уравнения калибровали по данным термоциклирования сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ через полный интервал мартенситных превращений под постоянным напряжением 50 МПа. На рисунке 8 представлено сравнение расчётных и экспериментальных значений накопленной пластической деформации при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ и модельного материала через различную долю температурного интервала прямого превращения. Видно, что расчётные значения пластической деформации в первых термоциклах близки к экспериментальным значениям, но при больших значениях N возникают различия между расчётными и экспериментальными зависимостями $\varepsilon_{nl}(N)$. Так к 30 циклу при термоциклировании через полный интервал мартенситных превращений разность составляет 1%. С целью более адекватного описания экспериментальных результатов закон изменения F_n^y был модифицирован путём введения нелинейной связи между dF_n^y и $(F_n^y - F_0^y)$: $dF_n^y = h |d\Phi_n^p| + r_1(F_n^y - F_0^y)^\alpha H(F_n^y - F_0^y)d\Phi_n H(-d\Phi_n)$. Установлено, что при значении показателя $\alpha=2,1$, экспериментальные и расчётные зависимости $\varepsilon_{nl}(N)$ хорошо соответствуют друг другу (Рисунок 9). Таким образом, модификация

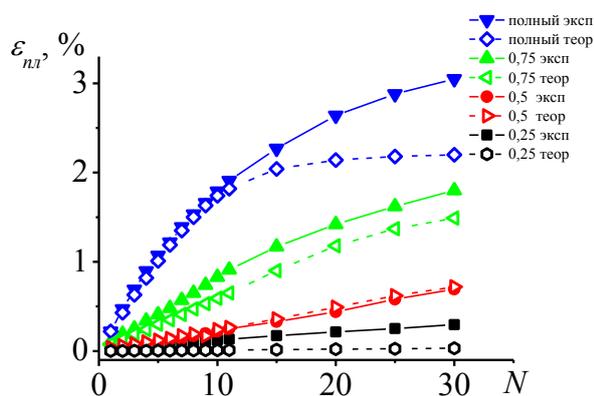


Рисунок 8. Расчётные и экспериментальные зависимости накопленной пластической деформации от числа циклов при термоциклировании через различную долю температурного интервала прямого превращения.

уравнения изменения F_n^y позволила качественно и количественно описывать и прогнозировать изменение деформации при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$.

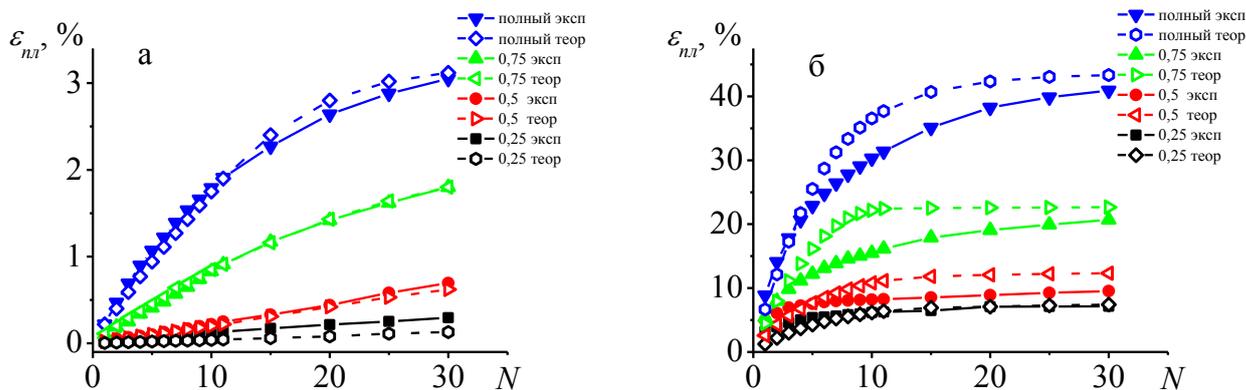


Рисунок 9. Расчётные и экспериментальные зависимости накопленной пластической деформации в сплаве $Ti_{50}Ni_{50}$ от числа циклов при термоциклировании через различную долю температурного интервала прямого превращения под постоянным напряжением 50 МПа (а) и 200 МПа (б).

ВЫВОДЫ

1. В результате термоциклирования сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ через интервал мартенситных превращений часть объёма материала испытывает при охлаждении $B2 \rightarrow B19'$ переход, тогда как другая часть претерпевает цепочку превращений $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$. Этот факт является следствием неоднородного распределения дефектов кристаллической решётки, возникающих при многократно повторяющихся фазовых переходах.
2. Накопление необратимой деформации при термоциклировании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ под нагрузкой происходит при охлаждении в процессе прямого фазового перехода. Макроскопическая пластическая деформация развивается вследствие аккомодации локальных напряжений, создаваемых "благоприятными" вариантами мартенсита, производящими сдвиг, сонаправленный с действующей нагрузкой.
3. Возрастание плотности дефектов решётки и величины необратимой деформации происходит, в основном, во второй половине температурного интервала прямого мартенситного превращения.
4. В процессе термоциклирования $TiNi$ под напряжением, не превышающем предел переориентации мартенсита, макроскопическая деформация возникает вследствие зарождения, непосредственно из аустенитной фазы, "благоприятно ориентированных" по отношению к внешней нагрузке мартенситных кристаллов. При термоциклировании под напряжением, превышающем предел переориентации мартенсита, "благоприятные" варианты дополнительно образуются по механизму силовой переориентации существующих "неблагоприятно ориентированных" кристаллов, что приводит к существенному возрастанию накапливаемой необратимой деформации.

5. В процессе термоциклирования сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ на этапе нагревания через температурный интервал обратного превращения происходит разупрочнение материала, величина которого пропорциональна доле материала, претерпевшего переход мартенсит \rightarrow аустенит.

6. Предложенная модификация закона изменения критического значения силы микропластического течения в структурно-аналитической теории прочности, путём введения нелинейной связи между dF_n^y и величиной упрочнения, позволяет описать зависимости накопления пластической деформации при термоциклировании сплава TiNi.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. S. Belyaev, N. Resnina, A. Sibirev Peculiarities of residual strain accumulation during thermal cycling of TiNi alloy // Journal of Alloys and Compounds, 2012. Vol. 542, pp. 37-42

2. Сибирев А.В., Реснина Н.Н., Евард М.Е., Волков А.Е., Беляев С.П. Накопление необратимой деформации при многократных теплосменах в никелиде титана: эксперимент и расчёт // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки, 2013. Т. 18, № 4. С. 2031-2032.

3. S. Belyaev, N. Resnina, A. Sibirev. Accumulation of Residual Strain in TiNi Alloy During Thermal Cycling // Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, Vol. 23, pp 2339-2342.

Статьи в других изданиях:

4. С.П. Беляев, Н.Н. Реснина, А.В. Сибирев Необычные мультстадийные превращения в сплаве TiNi с эффектом памяти формы после термоциклирования // Сборник трудов конференции VI-я Евразийская научно-практическая конференция "Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2012" 2, Москва, 2012. С. 151.

5. Беляев С.П., Реснина Н.Н., Сибирев А.В. Влияние режима термоциклирования на накопление необратимой деформации в сплаве никелида титана // Сборник материалов "XX Петербургские чтения по проблемам прочности", 10-12 апреля 2012, СПб, 2012. С. 191-193.

6. Беляев С.П., Реснина Н.Н., Сибирев А.В. Влияние температурного режима термоциклирования на необратимое изменение деформации никелида титана // Научно-технический семинар "Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов" г. Москва, 2011. С. 79

7. Беляев С.П., Реснина Н.Н., Сибирев А.В. Изменение кинетики мартенситных превращений в сплаве TiNi при многократных теплосменах // Сборник материалов 50-го международного симпозиума «Актуальные проблемы прочности» 27 сентября – 1 октября 2010 г. Витебск. 2010. Часть 1, с.96.

8. S. Belyaev, N. Resnina, A. Sibirev Strain variation during thermal cycling the TiNi alloy under constant stress through the temperature range of incomplete martensitic transformation. // The 9th European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT). Saint-Petersburg. September 9-16, 2012. p 92.
9. Беляев С.П., Реснина Н.Н., Сибирев А.В. Необратимая деформация сплава TiNi при неполных мартенситных превращениях // Сборник тезисов докладов 54 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Екатеринбург: ФГБУН ИФМ УрО РАН. 11-15 ноября 2013 г. с. 107.
10. Беляев С.П., Реснина Н.Н., Сибирев А.В., Волков А.Е. Изменение деформации при термоциклировании сплава TiNi // Материалы конференции международная конференция "Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы" 26-30 мая 2014 г. Витебск, Беларусь. с. 27.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang W., Sandström R. Analysis of the influence of cycling on TiNi shape memory alloy properties // Mater. Des. 1993. Vol. 14, № 2. P. 103–113.
2. Furuya Y., Park Y.C. Thermal cyclic deformation and degradation of shape memory effect in Ti-Ni alloy // Nondestruct. Test. Eval. 1992. Vol. 8-9, № 1-6. P. 541–554.
3. Otsuka K., Ren X. Martensitic transformations in nonferrous shape memory alloys // Mater. Sci. Eng. A. 1999. Vol. 273-275. P. 89–105.
4. Basinski Z.S., Dugdale J.S., Howie A. The electrical resistivity of dislocations // Philos. Mag. 1963. Vol. 8, № 96. P. 1989–1997.