

На правах рукописи

Реснина Наталья Николаевна

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ КИНЕТИКУ
МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ИЗМЕНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ В
СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА**

Специальность 01.02.04 – “Механика деформируемого твердого тела”

Автореферат

диссертации на соискание

ученой степени кандидата физико-математических наук

Санкт Петербург – 2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель	кандидат физико-математических наук Волков Александр Евгеньевич
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор Куксенко Виктор Степанович доктор физико-математических наук, Фрейдин Александр Борисович
Ведущая организация	Московский государственный институт стали и сплавов

Защита состоится ____ сентября 2003 года в ____ на заседании диссертационного совета Д.212.229.08 в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, учебный корпус 2, ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета

Автореферат разослан " " августа 2003 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.212.229.08,
кандидат физико-математических наук

Т.В.Воробьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Известно, что основным механизмом обратимого неупругого формоизменения, наблюдаемого в сплавах на основе никелида титана, являются термоупругие мартенситные превращения. В соответствии с этим долгое время полагали, что эффекты памяти формы реализуются строго в интервалах мартенситных переходов, что неоднократно было экспериментально подтверждено. Вместе с тем, известны работы, в которых было обнаружено, что совпадение температурных интервалов реализации деформационных эффектов и структурных превращений наблюдается не всегда. Анализ литературных данных показал, что на температурную кинетику мартенситных превращений и изменения деформации должна оказывать влияние предыстория термомеханического нагружения. Однако подробного исследования этого влияния выполнено не было. Вместе с тем изучение взаимодействия структурных превращений и неупругого деформирования очень важно как в научном плане, поскольку эти знания необходимы для адекватного теоретического описания функциональных свойств материалов с памятью формы, так и в практическом – при проектировании датчиков, приводов и других устройств. Из вышесказанного следует, что исследование взаимосвязи между неупругим деформированием и мартенситными превращениями приобретает особую актуальность.

Целью работы является экспериментальное выявление связи мартенситных превращений и формоизменения в деформированных и напряженных сплавах; разработка физических представлений о влиянии напряжения на механизмы неупругой деформации; апробация структурно-аналитической теории прочности.

В соответствии с поставленной целью в задачи исследования входило:

1. создание методики одновременного экспериментального изучения тепловых явлений и механического поведения материалов с эффектами памяти;
2. экспериментальное исследование влияния напряжения и предварительной деформации на соответствие температурных интервалов реализации мартенситных превращений и отдельно взятого деформационного явления

(эффекта пластичности превращения, памяти формы, обратимой памяти формы, генерации и релаксации реактивных напряжений).

3. Моделирование процессов превращения и деформирования материалов на основе структурно аналитической теории прочности;

Научная новизна. Получены новые закономерности, связывающие неупругое деформирование и мартенситные превращения в сплавах на основе никелида титана. Установлено влияние напряжения на соответствие температурных интервалов структурных превращений и проявления эффектов памяти формы. Показано, что нарушение однозначной связи между мартенситными превращениями и неупругим деформированием наблюдается при малых напряжениях (до 100 МПа).

Практическая значимость Результаты работы указывают на необходимость учета при разработке приложений и при определении температур их срабатывания величины предварительной деформации и действующего напряжения.

Обоснованность научных положений и выводов, достоверность результатов обеспечены аккуратностью выполнения экспериментов с использованием современных средств испытаний и измерений, одновременным изучением механических и физических свойств сплавов в различных режимах термомеханического нагружения; сопоставлении результатов, полученных с помощью различных экспериментальных методик, соответствии найденных закономерностей имеющимся теоретическим представлениям, хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика одновременного изучения тепловых явлений и механического поведения материалов с памятью формы.
2. Закономерности влияния напряжения на накопление неупругой деформации вне интервала мартенситных переходов.
3. Закономерности влияния предварительной деформации и напряжения на температурные интервалы обратного мартенситного перехода и восстановление деформации в никелиде титана.

4. Закономерности, связывающие температурную кинетику мартенситных превращений и изменение деформации и напряжения при реализации эффектов обратимой памяти формы и генерации и релаксации реактивных напряжений.
5. Результаты моделирования процессов превращения и деформирования материалов во время термоциклирования при различных краевых механических условиях с помощью структурно-аналитической теории прочности.

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на IV Международном семинаре «Современные проблемы прочности» имени В. А. Лихачева в г. Старая Русса (сентябрь 2000 г), XXXVI Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» г. Витебске (сентябрь 2000 г), XXXVII семинаре «Актуальные проблемы прочности» г. Киев (июль 2001 г.), XXXVIII семинаре «Актуальные проблемы прочности» г. Санкт Петербург (сентябрь 2001 г.), Первой конференции молодых учёных научной школы В.В. Новожилова “Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела” г. Санкт-Петербург (апрель 2002 г.), Всероссийской конференции “Дефекты структуры и прочность кристаллов” г. Черноголовка (июнь 2002 г.), ISOMAT-03 г. Хельсинки (июнь 2002г.), XI семинаре “Актуальные проблемы прочности” г. Великий Новгород (октябрь 2002 г.), III Международной конференции "Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений" г. Тамбов (июнь 2003г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ, перечень которых приведен в конце автореферата, кроме этого опубликована статья “О соответствии механических и теплофизических свойств никелида титана во время реализации эффектов памяти” //Материаловедение, –2003. Т.–7. С.–32–36. и статья “Исследование взаимосвязи деформационных эффектов и фазового превращения в $Ti_{55}Ni_{44.5}Fe_{0.5}$ ” //Вестник Тамбовского Университета, –2003. Т.–8.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 64 наименований.

Содержание работы

Введение содержит краткое обоснование актуальности экспериментального исследования взаимосвязи механических явлений и мартенситных превращений, наблюдаемых в сплавах на основе никелида титана. Показана научная новизна работы, сформулированы цели и основные результаты работы.

Первая глава посвящена обзору литературы и состоит из четырех разделов. В главе приведены описание и закономерности развития основных эффектов памяти формы, таких как псевдоупругость, пластичность превращения, память формы, обратимая память формы, генерация и релаксация реактивных напряжений. Рассмотрены основные механизмы обратимого формоизменения, к которым относятся термоупругие мартенситные превращения и механическое двойникование. Характеристики термоупругих мартенситных переходов рассмотрены как в общем случае, так и на примере никелида титана. Представлен обзор имеющихся экспериментальных результатов по влиянию внешнего напряжения как на закономерности протекания мартенситных превращений и механического двойникования, так и на особенности реализации эффектов памяти. Даны основные положения модели, применяемой в расчетах и основанной на структурно – аналитической теории прочности [1, 3]. Проведенный анализ литературы показал большую разрозненность экспериментальных данных в вопросе о соответствии температурных интервалов реализации мартенситных превращений и эффектов памяти и выявил отсутствие исследование влияния внешних факторов, таких как предварительная термообработка, вид напряженного состояния и величина приложенных напряжений, на величину этого несоответствия.

Во второй главе состоящей из двух разделов, сформулирована цель диссертационной работы и задачи исследования; изложены методики проведенных экспериментов.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментов. Глава состоит из четырех разделов, каждый из которых посвящен изучению вопроса о влиянии напряжения на соответствие температурных интервалов реализации мартенситных переходов и отдельно взятого деформационного

явления. Вопрос исследован на примере эффектов пластичности превращения, памяти формы, обратимой памяти формы, генерации и релаксации реактивных напряжений.

В первом разделе представлены результаты исследования взаимосвязи между прямыми мартенситными переходами и эффектом пластичности превращения на примере сплавов $Ti_{52}Ni_{47,5}Fe_{0,5}$ и $Ti_{52,5}Ni_{47}Fe_{0,5}$ с помощью одновременного изучения изменения электросопротивления и механических характеристик (деформации и напряжения). Показано, что при охлаждении под постоянным напряжением накопление деформации начинается раньше температуры прямого мартенситного перехода, регистрируемой по изменению электросопротивления (рис. 1 а). Установлено, что увеличение напряжения приводит к росту накапливаемой на этом этапе деформации (до 20 % от общей величины формовосстановления (рис. 1 б)).

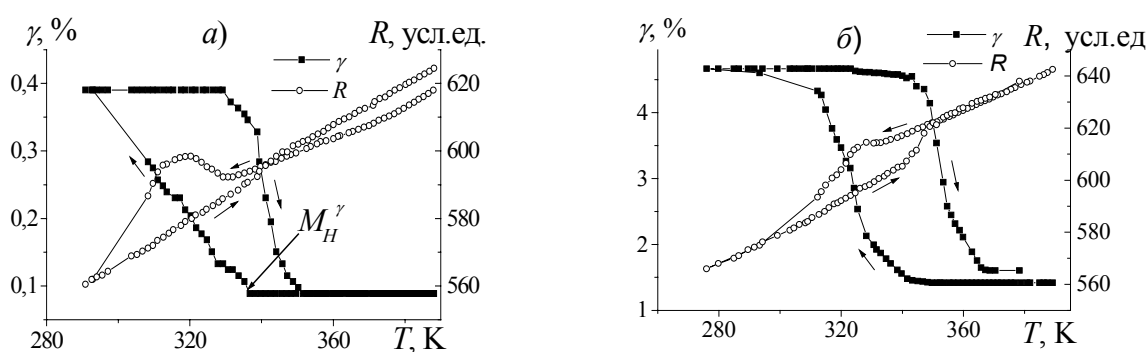


Рис. 1. Зависимости электросопротивления $R(T)$ и деформации $\gamma(T)$, полученные для сплава $Ti_{52}Ni_{47,5}Fe_{0,5}$ при охлаждении и нагреве под постоянным напряжением: $\tau = 7$ МПа (а), $\tau = 80$ МПа (б).

Исследовано влияние снижения модуля упругости высокотемпературной фазы в предмартенситной области температур на процесс накопления деформации в сплавах претерпевающих $B2 \rightarrow B19'$ и $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ превращения. Обнаружено, что данное явление не может быть основной причиной накопления деформации при охлаждении в этом интервале температур, поскольку вне температур фазового перехода измеренное изменение упругой деформации не превосходит 4 – 8 % от величины полной деформации.

Во время изучения поведения материала при охлаждении под постоянной нагрузкой обнаружено уменьшение высоты пика ΔR на кривой

электросопротивления, связанного с $B2 \rightarrow R$ превращением, при увеличении величины приложенного напряжения. Это явление наблюдалось и другими авторами, которые основной причиной данного процесса считали различное смещение характеристических температур $B2 \rightarrow R$ и $B2 \rightarrow B19'$ переходов, происходящее под напряжением. Сопоставление экспериментально измеренного смещения температур фазовых переходов и изменения аномалии на кривой электросопротивления показало, что наблюдаемое снижение величины ΔR невозможно объяснить только наложением $B2 \rightarrow B19'$ превращения на $B2 \rightarrow R$ переход. По-видимому, приложенное напряжение, складываясь с внутренними напряжениями, разрушает условия благоприятные для образования R фазы. Это предположение хорошо согласуется с данными [2], которые показывают, что $B2 \rightarrow R$ превращение реализуется лишь в местах максимальной концентрации напряжений, в противном случае в этой области происходит $B2 \rightarrow B19'$ переход.

Второй раздел посвящен исследованию соответствия температурных интервалов реализации обратного мартенситного превращения и эффекта памяти формы. С помощью методики позволяющей одновременно проводить дифференциальный термический анализ, и измерять механические характеристики (деформацию и напряжение) исследованы два случая проявления эффекта памяти формы: формовосстановление во время нагревания предварительно продеформированного образца при отсутствии напряжений и под постоянным напряжением. Обнаружено, что вне зависимости от термомеханических условий восстановление деформации в образце (сплав $Ti_{55}Ni_{44,5}Fe_{0,5}$) начинается при температуре A_H' , превышающей температуру обратного мартенситного перехода A_H на 13 К (рис. 2 а). Присутствие во время нагревания напряжения, противодействующего восстановлению формы, приводит к увеличению разницы между температурами начала физических и механических процессов на 40-50 % (рис. 2. в), подобное было обнаружено в [4]. Показано, что увеличение предварительной деформации вызывает постепенное совмещение температурных интервалов обратного мартенситного перехода и эффекта памяти формы, которое наиболее сильно проявляется при

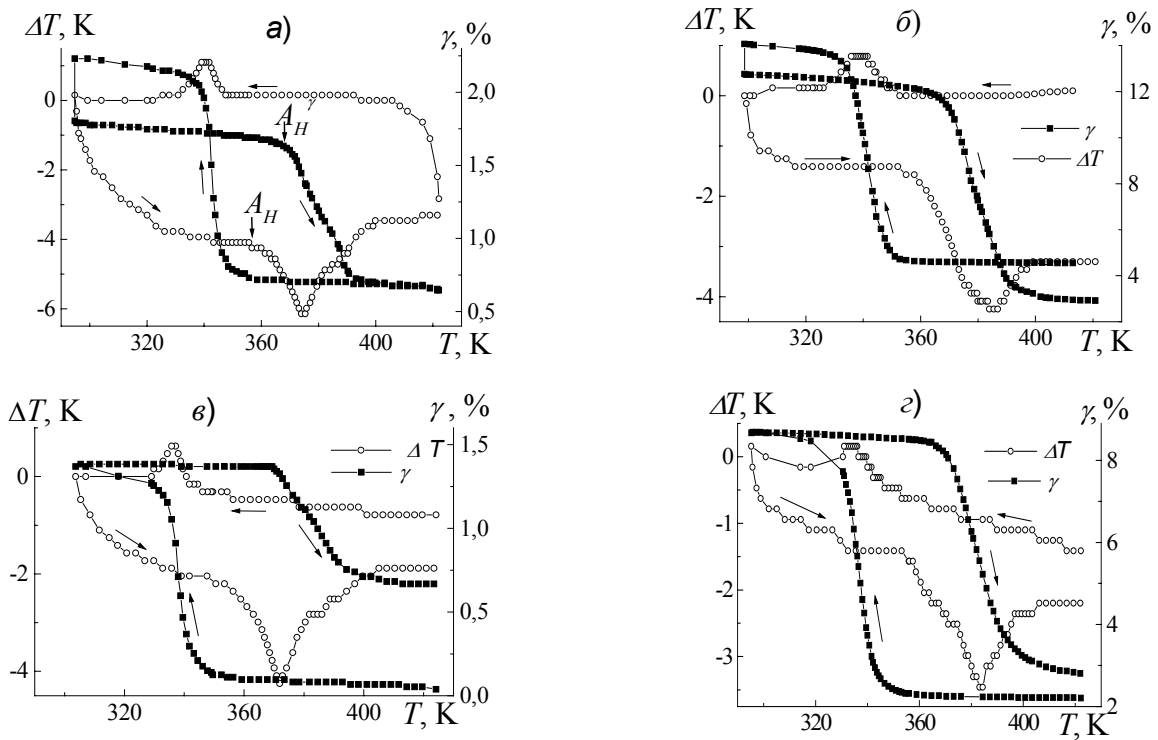


Рис. 2. Зависимости деформации $\gamma(T)$ и данные дифференциального термического анализа $\Delta T(T)$, полученные для сплава $Ti_{55}Ni_{44.5}Fe_{0.5}$ во время нагрева в свободном состоянии после предварительной деформации 1(а) и 7.5 % (б) и при термоциклировании под напряжением 20 (в) и 60 МПа (г).

нагревании под постоянным напряжением. Так, при увеличении предварительной деформации до 9 % интервал $A_H^{\gamma} - A_H$ уменьшается до 10 К во время нагревания в свободном состоянии, и до 8 К под напряжением (рис. 2 б, 2 г).

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии установлено, что предварительное сжатие (сплав $Ti_{49.7}Ni_{50.3}$) приводит при последующем нагревании к уширению существующего пика (при 322 К) на кривой зависимости теплоемкости от температуры и смещению его в область бóльших

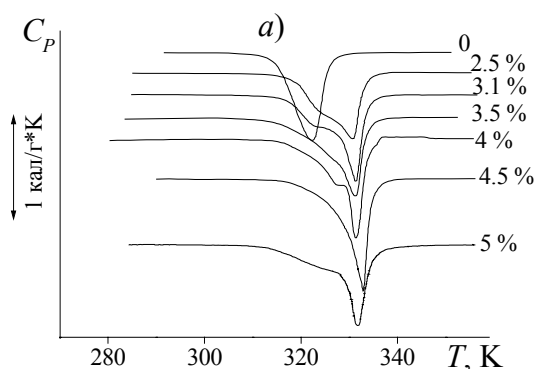


Рис. 3. Результаты калориметрических исследований сплава $Ti_{49.7}Ni_{50.3}$ после различной предварительной деформации, величина которой указана у кривых, во время нагревания.

температур на 4 К, а также к появлению дополнительного пика при температуре 331 К (рис. 3).

Анализ общей совокупности результатов, представленных в данном разделе, показал, что наблюдаемые явления (несоответствие температур обратного мартенситного перехода и возврата деформации, а также расщепление пика теплопоглощения) связаны с различием температурных интервалов обратного превращения полидоменного и монодоменизированного мартенсита, который образуется при предварительном деформировании. В отличие от преобразования полидоменного мартенсита обратное превращение монодоменизированного мартенсита происходит при бóльших температурах, и именно оно сопровождается восстановлением деформации. Предварительная деформация, а также постоянное напряжение, действующее при нагреве, приводит к увеличению объемной доли монодоменизированных областей, тем самым, увеличивая количество материала, участвующего в деформационных процессах и способствуя совмещению температурных интервалов деформационных процессов и структурных изменений.

В третьем разделе представлены результаты исследования соответствия температурных интервалов термоупругих мартенситных превращений и эффекта обратимой памяти в сплаве $Ti_{55}Ni_{44,5}Fe_{0,5}$. Обнаружено, что накопление деформации при охлаждении происходит в интервале температур прямого фазового превращения, в то время как при нагревании деформационный возврат начинается при температурах, превосходящих A_H на 15 – 20 К (рис. 4 а). Очевидно, величина внутренних напряжений, обуславливающих эффект обратимой памяти формы, оказывается недостаточной для монодоменизации мартенсита во всем объеме материала. Поскольку полидоменный мартенсит испытывает обратное превращение при более низких температурах, то начало формовосстановления оказывается смещено относительно температуры начала обратного мартенситного перехода. Многократное циклирование в режиме обратимой памяти формы приводит к дополнительному увеличению на 10 К температурного интервала $A_H^y - A_H$ (рис. 4 б.), поскольку сопровождается

частичной релаксацией внутренних напряжений. Это подтверждается уменьшением величины самопроизвольного деформирования.

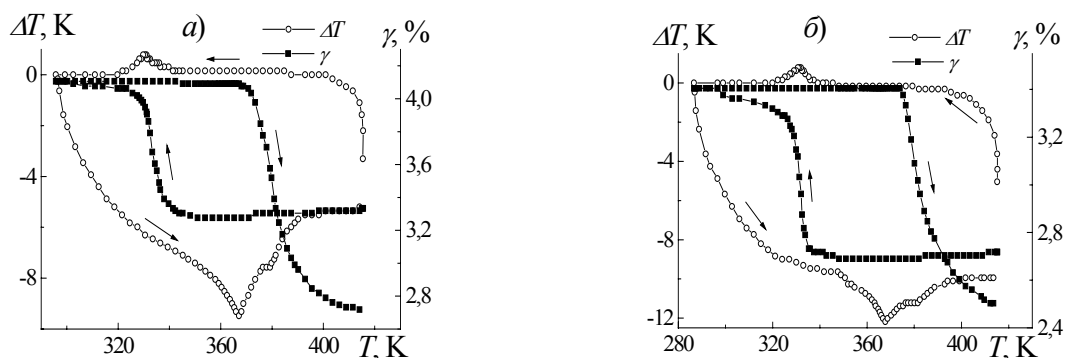


Рис. 4. Зависимости деформации $\gamma(T)$ и результаты ДТА $\Delta T(T)$, полученные в $Ti_{55}Ni_{44,5}Fe_{0,5}$ во время реализации эффектов обратимой памяти формы в первом (а) и третьем (б) термоциклах.

В последнем разделе представлены результаты исследования соответствия температурных интервалов проявления эффекта генерации и релаксации реактивных напряжений и мартенситных переходов в сплаве $Ti_{55}Ni_{44,5}Fe_{0,5}$. Обнаружено, что при нагревании температуры начала и окончания генерации реактивных напряжений соответствуют температурному интервалу обратного мартенситного перехода (аномалии на кривой $\Delta T(T)$). Однако в интервале

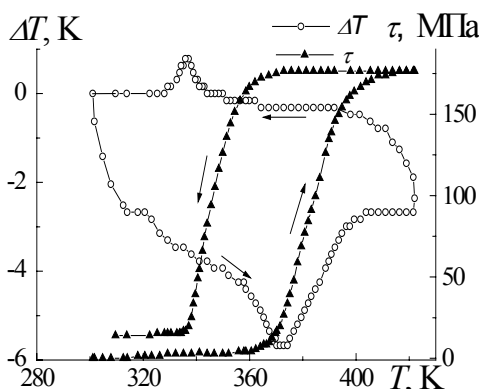


Рис. 5. Зависимости реактивных напряжений $\tau(T)$ и $\Delta T(T)$, полученные в $Ti_{55}Ni_{44,5}Fe_{0,5}$ в первом термоцикле.

температур $A_H \div T_{пика}$, где $T_{пика}$ характеризует положение пика аномалии на кривой $\Delta T(T)$, происходит генерация лишь 5% от общей величины напряжений, в то время как основной процесс (95%) осуществляется на завершающей стадии обратного мартенситного перехода рис. 5.

Установлено, что во время охлаждения температура начала релаксации напряжения равна 370 К, что на 8 К выше температуры начала теплового эффекта, в то время как окончание процесса релаксации напряжений происходит при температуре пика аномалии на кривой $\Delta T(T)$.

Четвертая глава состоит из трех разделов. В первом разделе представлены результаты подбора постоянных материала, используемых в расчете. При расчете полагали, что модельный материал состоит из 20 зерен, в каждом из которых задана своя ориентация кристаллических осей относительно лабораторного базиса. Параметрами материала являются: температуры фазовых превращений M_H , M_K , A_H , A_K ; термодинамическая сила начала микропластического течения материала в исходном состоянии F_0^y ; κ – коэффициент масштаба микропластической деформации; h , – модуль микропластичности, r – коэффициент возврата силы течения при обратном превращении [1]. Подбор параметров осуществляли по экспериментальным кривым $\gamma(T)$, полученным при теплосменах под постоянным напряжением величину которого изменяли от цикла к циклу от 0 до 80 МПа. Полученные значения постоянных материала: $M_H = 330$ К, $M_K = 306$ К, $A_H = 349$ К, $A_K = 385$ К, $F_0^y = 5$ МПа, $\kappa = 7$, $h = 0,065$ и $r = 0,2$. использовали при дальнейших расчетах.

Во втором разделе представлены результаты расчета поведения материала при теплосменах под постоянным напряжением, возрастающем от цикла к циклу. Оказалось, что температурные интервалы деформационных и структурных аномалий не совпадают, причем это несоответствие сильнее проявляется при малых напряжениях. Установлено, что во время нагревания под напряжением 20 МПа в деформационных явлениях участвует лишь треть материала, претерпевающего структурные изменения (рис. 6 б). Увеличение

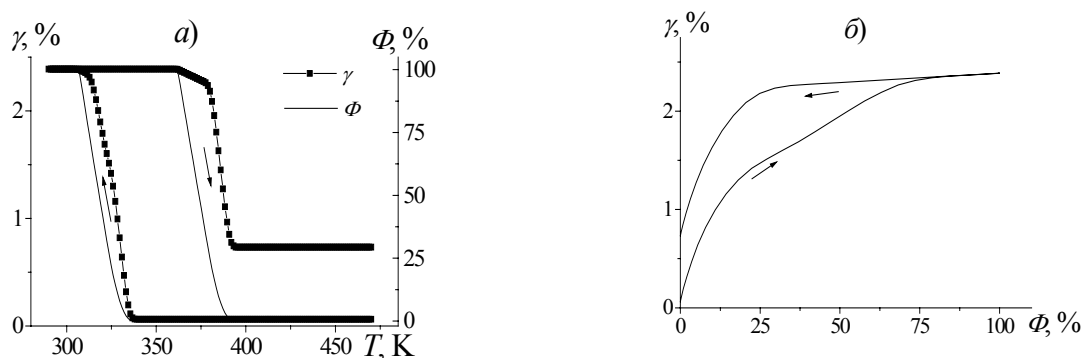


Рис. 6. Расчетные зависимости $\gamma(T)$ и $\Phi(T)$ (а), $\gamma(\Phi)$ (б) при термоциклировании под напряжением 20 МПа.

напряжения, действующего во время теплосмен, приводит к росту количества монодоменизированного мартенсита при нагревании. Это вызывает увеличение обратимой неупругой деформации и постепенное совмещение температурных интервалов деформационных явлений и структурных переходов при последующем нагревании. Так, во время термоциклирования под напряжением 40 МПа количество монодоменизированного мартенсита увеличивается до 60 %, а интервал $A_H^\gamma \div A_H$ сужается до 8 К. При $\tau \geq 60$ МПа температурные интервалы реализации эффекта памяти формы и фазового перехода совмещаются, при этом, как показали результаты расчета, восстановление формы происходит на всем протяжении обратного мартенситного превращения.

В третьем разделе представлены результаты расчета изменения деформации и количества мартенсита в режиме генерации и релаксации реактивных напряжений. Установлено, что во время нагревания генерация реактивных напряжений осуществляется в интервале обратного мартенситного превращения, однако этот процесс происходит в несколько этапов (рис. 7). Обнаружено, что интервалы интенсивной генерации чередуются с участками, на которых изменение фазового состава вызывает слабое увеличение напряжения. При охлаждении релаксация реактивных напряжений осуществляется в узком интервале изменения количества мартенсита (рис. 7). Изменение фазового состава на 10 % оказывается достаточным для полной релаксации напряжений (подобное наблюдали и в эксперименте (рис. 5)). Такое поведение обусловлено низким уровнем напряжений, возникающих при нагревании, и большой жесткостью системы.

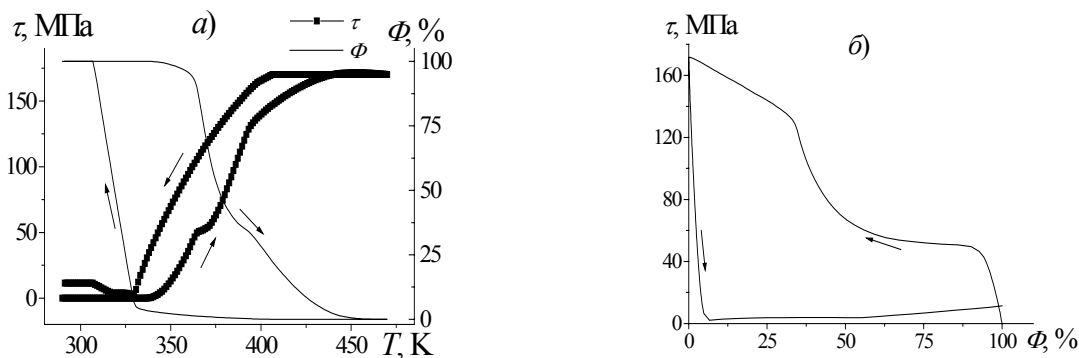


Рис. 7. Расчетные зависимости $\tau(T)$, $\Phi(T)$ (а), $\tau(\Phi)$ (б) при первом термоциклировании.

Установлено хорошее согласование всей совокупности расчетных и экспериментальных результатов. Соответствие результатов моделирования опытным данным оправдывает выбор используемой модели и подтверждает правильность развиваемого подхода для описания процессов превращения и деформирования в материалах с памятью формы.

В пятой главе представлен анализ всей совокупности полученных экспериментальных и теоретических данных. Констатируется, что однозначное соответствие между температурными интервалами мартенситных превращений и эффектов памяти формы наблюдается далеко не всегда. Характер этих различий зависит от термомеханических условий, в которых находится материал и от величины действующих напряжений. Полученные данные интерпретированы с учетом того, что в материале имеется полидоменные и монодоменизированные области мартенсита, которые имеют различные температурные интервалы. В этом случае изменение физического параметра (например, электросопротивления) фиксирует интегральную кривую, в то время как изменение деформации связано только с преобразованием монодоменизированного мартенсита. Таким образом, одновременное измерение механических и физических свойств должно приводить к несовпадению температур начала фазовых переходов и неупругого деформирования, что и наблюдается экспериментально.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Создана методика экспериментального изучения одновременного изменения тепловых явлений и механического поведения материалов с эффектами памяти
2. Температурные интервалы изменения деформации и мартенситных превращений в общем случае не совпадают при реализации всех основных эффектов памяти формы.
3. В условиях охлаждения сплавов на основе никелида титана при постоянном напряжении, деформирование в направлении силы начинается за 10 – 15 К до начала прямого мартенситного превращения. Деформация, накапливаемая на этом участке, является неупругой и обратимой при

нагревании и может быть связана с образованием промежуточных структур сдвига в предмартенситной области.

4. Обратное превращение в предварительно деформированных сплавах на основе никелида титана происходит в два отчетливо различимых этапа, причем первый из них может не сопровождаться возвратом деформации. Двухстадийность обратного превращения обусловлена различной температурной кинетикой обратного превращения монодоменизированного и полидоменного мартенсита.

5. Несовпадение температурных интервалов обратного мартенситного превращения и восстановления деформации уменьшается с ростом предварительной деформации или величины приложенного напряжения, действующего при нагревании и охлаждении.

6. Модель, учитывающая структурное строение материала и предполагающая индивидуальную температурную кинетику роста вариантов мартенсита, описывает наблюдаемые на опыте стадии превращения, сопровождаемые и несопровождаемые изменением деформации. Моделирование показывает, что не существует каких-то особых механизмов сдвига температур изменения деформации, а все определяется закономерностями роста отдельных вариантов мартенсита.

Литература

1. Волков А. Е. Микроструктурное моделирование деформации сплавов при повторяющихся мартенситных превращениях. // Изв. АН Физическая, –2002. –Т. 66. –№ 9. –С. 1290 – 1297.
2. Зельдович В. И., Хомская И. В., Фролова Н. Ю. Сбитнева Г. А. Наблюдение гетерогенного зарождения мартенсита в никелиде титана // Труды XXXVIII Международного семинара «Актуальные проблемы прочности», г. Санкт Петербург, 24-27 сентября 2001 г. – Санкт Петербург. 2001. – С.63-67
3. Лихачев В. А., Малинин В. Г. Структурно-аналитическая теория прочности –СПб.: Наука, 1993. –471 с.

4. Паскаль Ю. И., Ерофеев П. Я., Монасевич Л. А., Павская В. А. Мартенситная деформация никелида титана // Изв. Вузов. Физика, –1982. – Т. 25. –№ 6. –С. 103 – 117.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Егоров С. А., Евард М. Е., Реснина Н. Н. Различие влияния сдвиговых напряжений на превращения $B2 \rightarrow R$ и $R \rightarrow B19'$ в сплаве TiNi. // Научные труды IV Международного семинара «Современные проблемы прочности» имени В. А. Лихачева, г. Старая Русса, 18 - 22 сентября 2000 г. – Великий Новгород.– 2000. –С. 102-109.
2. М. Е. Евард, С. А. Егоров, Н. Н. Реснина Мартенситные превращения в сплаве TiNi при охлаждении под нагрузкой. // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирование механического поведения материалов/ Труды XXXVI Международного семинара «Актуальные проблемы прочности», г. Витебск, 26-29 сентября 2000 г. – Витебск.– 2000. – С. 330-335.
3. Егоров С. А., Евард М. Е., Реснина Н. Н., Сидорова О. В. О механизмах деформирования сплава TiNi при охлаждении под нагрузкой. // Труды XXXVIII Международного семинара «Актуальные проблемы прочности», г. Санкт Петербург, 24-27 сентября 2001 г. – Санкт Петербург.– 2001. – С.253-256
4. С. А. Егоров, Н. Н. Реснина, М. Е. Евард, А.Е. Волков. Влияние напряжений на теплофизические свойства мартенситных превращений в TiNi. // Труды XXXVIII Международного семинара «Актуальные проблемы прочности», г. Санкт Петербург, 24-27 сентября 2001г. – Санкт Петербург – 2001 –С.57-62
5. С. А. Егоров, Н. Н. Реснина, М. Е. Евард, А. Е. Волков О взаимном соответствии мартенситных превращений и эффектов памяти в никелиде титана // Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела. Вып.6. СПб. –2002. –С. 64-71.