

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана

Математико-механического факультета

Елена Владимировна Кустова



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения
Диссертации Сибирева Алексея Владимировича,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по теме «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы»

по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

и выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», 2024

а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения, замечания и рекомендации:

Диссертация Сибирева Алексея Владимировича посвящена решению актуальной задачи механики и физики функциональных материалов с памятью формы, связанной с разработкой научно-обоснованных методов повышения термоциклической стабильности функциональных свойств сплавов на основе NiTi. В работе исследованы закономерности изменения деформации и генерируемых усилий при термоциклировании сплава NiTi в различных температурно-силовых режимах. Результаты исследования послужили основой для разработки оптимальных температурных, деформационных и силовых режимов рабочего цикла привода из сплава NiTi, демонстрирующего высокую стабильность параметров при многократных теплосменах.

Актуальность работы обусловлена тем, что сплавы с эффектом памяти формы на основе NiTi находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности, в качестве приводов многократного действия, которые имеют значительные преимущества по сравнению с аналогами. Однако, при многократных теплосменах в сплавах с памятью формы меняется структура, увеличивается плотности дефектов, что влияет на параметры мартенситных переходов, механические и функциональные свойства сплавов. Такие изменения нежелательны, так как приводят к изменению геометрических размеров и силовых характеристик рабочего тела устройства и, следовательно, снижают

эксплуатационный ресурс привода. Поэтому **актуальной задачей** является разработка методов повышения термоциклической стабильности функциональных свойств сплавов с памятью формы на основе NiTi.

Работа содержит 197 страниц и состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена исследованию взаимосвязи между изменением плотности дефектов кристаллической решетки и свойств сплавов с памятью формы (параметров мартенситных переходов, обратимой и необратимой деформации, совершаемой работы) при термоциклировании через температурный интервал мартенситных превращений в различных условиях. Рассмотрены вопросы о влиянии изотермических выдержек на изменения свойств сплава NiTi предварительно подвергнутого многократным теплосменам через температурный интервал мартенситных превращений в ненапряженном состоянии или под постоянным напряжением; особенности зарождения и исчезновения кристаллов мартенсита при охлаждении и нагреве недеформированного и деформированного сплава NiTi; о взаимосвязи между плотностью дислокаций и температурами мартенситных превращений в сплавах NiTi.

Вторая глава посвящена исследованию изменений свойств сплава NiTi при термоциклировании через температурный интервал неполных мартенситных превращений под постоянным напряжением. Исследовано влияние долей прямого или обратного переходов, вовлеченных в термоцикл, на изменение температур мартенситных переходов, обратимой и необратимой деформации при термоциклировании. Изучено влияние напряжения на изменение свойств при термоциклировании через различную долю прямого и обратного переходов.

Третья глава посвящена исследованию изменения свойств сплава NiTi при термоциклировании в режиме привода, т.е. при термоциклировании системы «сплав NiTi-упругое контртело» в различных температурных, деформационных и силовых режимах. Изучено влияние способа взведения привода, жёсткости упруго контртела, предварительного упрочнения аустенитной фазы, доли прямого и обратного превращения, максимальной и минимальной температур цикла на изменение свойств сплава NiTi при термоциклировании в режиме привода. На основании полученных данных разработаны рекомендации по выбору оптимальных параметров привода, обеспечивающих наиболее стабильную работу устройства. Создан прототип торсионного привода, на котором апробированы полученные рекомендации и результаты работы.

Наиболее значимые научные результаты, полученные автором лично:

1. Установлено, что выдержка предварительно термоциклированного сплава NiTi (в свободном состоянии или под постоянным напряжением) при различных температурах (как в мартенситном, так и в аустенитном состоянии), а также увеличение максимальной температуры в цикле приводят к увеличению температур мартенситного перехода и влияют на обратимую и необратимую деформацию, что обусловлено процессами возврата, в результате которых меняется плотность и распределение дефектов кристаллической решетки.

2. Установлена нелинейная зависимость между плотностью дефектов кристаллической решетки и изменением температур мартенситных превращений в сплаве NiTi при многократных теплосменах.

3. Установлено, что в отожженном сплаве NiTi последовательность исчезновения мартенситных кристаллов при нагревании не согласована с последовательностью их появления при предшествующем охлаждении. Показано, что в отожженном сплаве NiTi не наблюдается микроструктурная память, т.е. последовательность появления кристаллов мартенсита при охлаждении в различных циклах не повторяется. Предположено, что это связано с изменениями в дефектной структуре материала и в распределении внутренних напряжений при термоциклировании. Установлено, что в образце, в котором дислокационная структура была создана при активном деформировании в мартенситном состоянии, последовательность появления мартенситных кристаллов при охлаждении и исчезновения при нагревании согласованы, а от цикла к циклу проявляется микроструктурная память. Предположено, что это связано с тем, что дислокационная структура, созданная при активном деформировании, создает устойчивое поле внутренних напряжений, которое не меняется при термоциклировании.

4. Установлено влияние долей прямого и обратного мартенситного переходов, включенных в температурный интервал термоциклирования, на изменение свойств сплава при термоциклировании под постоянным напряжением или в режиме привода. Показано, что уменьшение доли прямого перехода снижает величину и скорость накопления необратимой деформации и стабилизирует функциональные свойства сплава NiTi при термоциклировании. Установлено, что максимальное подавление пластической деформации и наилучшая термоциклическая стабильность наблюдаются в том случае, если при охлаждении не реализуется вторая половина прямого перехода. Этот факт указывает на то, что именно в этом интервале происходят процессы, приводящие к увеличению плотности дефектов. Показано, что изменение режима термоциклирования с охлаждения и нагревания под постоянной нагрузкой на охлаждение и нагревание в режиме привода уменьшает долю прямого перехода, на котором наиболее интенсивно увеличивается плотность дефектов, с 50 до 10 %. Установлено, что уменьшение доли обратного перехода уменьшает темп накопления необратимой деформации и скорость изменения свойств при термоциклировании. Показано, что это обусловлено тем, что уменьшение доли обратного перехода реализуется за счет уменьшения максимальной температуры в цикле, в результате чего подавляются процессы возврата и затрудняется накопление деформации при последующем охлаждении.

5. Установлена нелинейная связь между максимальным реактивным напряжением и деформацией, восстановленной при нагревании сплава NiTi в режиме привода. Показано, что при больших жесткостях контртела увеличение реактивного напряжения прекращается, как только его величина достигнет напряжения течения аустенитной фазы. Это приводит к немонотонной зависимости работы, совершенной сплавом при нагревании, от жесткости контртела. Максимум совершенной работы наблюдается при жесткости 6-10 ГПа. Установлено, что способ предварительного деформирования элемента из сплава NiTi для «взведения» привода не оказывает влияния на изменение функциональных свойств при термоциклировании.

6. Установлено влияние положения минимальной и максимальной температур цикла относительно температур мартенситного перехода на изменение функциональных свойств и накопление необратимой деформации при термоциклировании сплава NiTi в режиме привода. Определено оптимальное положение температур цикла, при котором работа, совершенная сплавом при нагревании, максимальна, а накопленная пластическая деформация и изменение свойств при термоциклировании минимальны.

Научная новизна работы

Впервые исследовано влияние изотермических выдержек на восстановление температур и последовательности мартенситных превращений в сплаве NiTi, подвергнутом термоциклированию.

Впервые установлена нелинейная взаимосвязь между изменением плотности дефектов и температурами мартенситных переходов.

Впервые исследованы особенности движения межфазных границ при мартенситном превращении в сплаве NiTi после отжига и после предварительного деформирования в мартенситной фазе.

Впервые установлено влияние доли прямого и обратного перехода на изменение функциональных свойств сплава NiTi при термоциклировании под напряжением или в режиме привода.

Впервые установлено, что уменьшение доли прямого перехода наиболее эффективно для подавления пластической деформации и улучшения стабильности функциональных свойств сплава NiTi при термоциклировании как под постоянным напряжением, так и в режиме привода, по сравнению с уменьшением доли обратного перехода.

Впервые установлено, что связь между максимальным реактивным напряжением и обратимой деформацией является нелинейной, что связано с тем, что при высоких жесткостях контртела реактивное напряжение возрастает только до напряжения течения аустенитной фазы.

Впервые установлено влияние положения максимальной и минимальной температур в цикле относительно температур мартенситного перехода на изменение функциональных свойств сплава NiTi при термоциклировании в режиме привода.

Впервые разработаны рекомендации по выбору оптимальных температурных, деформационных и силовых условий термоциклирования сплава NiTi при которых изменение его свойств минимально.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что в работе получены новые фундаментальные знания о взаимосвязи между плотностью дефектов структуры сплава с изменением температур мартенситных переходов, обратимой и необратимой деформации и реактивных напряжений при термоциклировании сплава NiTi в различных режимах. Впервые установлено влияние доли прямого и обратного переходов на изменение функциональных свойств сплава NiTi при термоциклировании в режиме привода. Полученные результаты служат основой для разработки новых моделей описания и прогнозирования изменения свойств сплавов с памятью формы при термоциклировании с учетом новых закономерностей между изменением плотности дефектов и функциональными свойствами сплавов с памятью формы, что позволит использовать данные модели для расчета рабочих характеристик приводов и устройств многократного действия.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что на основе полученных данных разработаны рекомендации инженерам, разрабатывающим приводы на основе сплавов с памятью формы, по выбору силовых, деформационных и температурных режимов работы устройства, обеспечивающих минимальные изменения функциональных свойств сплава NiTi, а, следовательно, и рабочих характеристик

устройств при термоциклировании.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обоснована применением современных методик измерений и испытаний, воспроизводимостью экспериментальных результатов, согласованностью полученных результатов с результатами других зарубежных и отечественных научных групп.

Апробация результатов

Результаты научных исследований Сибирева А.В. представлены на 22 конференциях и опубликованы в 33 работах по теме исследования, из которых 17 статей опубликованы в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science (7 статей издано в журналах, входящих в Q1 согласно SJR). Научные исследования диссертанта выполнены при поддержке 5 грантов под личным руководством автора, из которых 2 гранта РФ (19-79-00106, 22-29-20021), 2 гранта РФФИ (16-31-60043, 14-08-31085) и 1 грант Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК-1261.2017.8). Часть результатов была выполнена при поддержке грантов РФФИ (16-08-00346) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (мегагрант № 075-15-2022-1114).

Считаем, что диссертация Сибирева Алексея Владимировича на тему «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы» содержит новые результаты, направленные на решение важной научной проблемы механики деформируемых материалов с фазовыми превращениями, связанной с разработкой новых представлений о процессах, происходящих при термоциклическом воздействии на сплав NiTi, и влиянии температурных, деформационных и силовых факторов на механическое поведение материала при термоциклировании.

Работа хорошо оформлена, удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, и рекомендуется к защите по специальности 1.1.8 Механики деформируемого твердого тела.

Нарушения со стороны Сибирева Алексея Владимировича

ФИО соискателя

п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. №11181/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

и Приказа СПбГУ от 03.07.2023 № 9287/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертации опубликованы в предложенных соискателем статьях.

Коллектив сотрудников Кафедры теории упругости рекомендовал диссертацию **Сибирева Алексея Владимировича** по теме «**Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы**» к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

При проведении голосования коллектива сотрудников кафедры Теории упругости (протокол заседания № 44/8/22-02-4 от 06.06.2024) в количестве 16 человек, участвовавших в заседании из 18 человек штатного состава:

Проголосовали «за»: 15 (Сибирев А.В. участие в голосовании не принимал),

«против»: 0,

«воздержались»: 0.

Подписал: профессор

(должность)

Кафедры теории упругости

(наименование структурного подразделения)

д.ф.-м.н.

(ученая степень)

профессор

(ученое звание)



(подпись)

Н.Ф. Морозов / 06.06.2024

Расшифровка подписи, дата