

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)**


В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; www.ipme.ru

ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001



УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт проблем
машинovedения Российской академии
наук, д.т.н.



Полянский В.А.

«19» ноября 2024 г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук на диссертацию Сибирева Алексея Владимировича «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Сибирева А.В. посвящена исследованию закономерностей изменения деформации и генерируемых усилий при термоциклировании сплава NiTi в различных термо-силовых режимах.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью разработки методов повышения термоциклической стабильности свойств сплавов с эффектом памяти формы на основе NiTi. Данные сплавы широко применяются в аэрокосмической, медицинской, автомобильной и робототехнической отраслях промышленности, поскольку они демонстрируют высокие значения восстанавливаемой деформации и развиваемых усилий. Однако, сплавы NiTi

демонстрируют низкую стабильность функциональных свойств при термоциклировании под постоянным напряжением или в режиме работы силового привода. Это приводит к тому, что в процессе эксплуатации устройств из сплавов с памятью формы на основе NiTi меняются рабочие характеристики, что сокращает их срок службы и требует дополнительных затрат на обслуживание. Таким образом, задача разработки эффективных научно-обоснованных методов повышения термоциклической стабильности функциональных свойств сплавов на основе NiTi является актуальной.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, 86 рисунков, 5 таблиц, библиографии из 160 наименований. Объем диссертации составляет 197 страниц.

Во **введении** обоснована актуальность, практическая и теоретическая значимость и новизна выбранной темы диссертации; сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, и основные научные результаты диссертационной работы.

В **первой главе** показано, 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 влияет на обратимую и необратимую деформацию, что обусловлено процессами возврата, в результате которых меняется плотность и распределение дефектов кристаллической решетки. Установлено, что в отожженном сплаве NiTi последовательность исчезновения мартенситных кристаллов при нагревании не согласована с последовательностью их появления при предшествующем охлаждении, не сохраняется и последовательность появления кристаллов мартенсита при охлаждении в различных циклах. Предположено, что это связано с изменением дефектной структуры и перераспределением 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. Это связано с тем, что дислокационная структура, созданная при активном деформировании, создает устойчивое поле внутренних напряжений, которое не меняется при термоциклировании.

Во **второй главе** изложены результаты исследований влияния долей прямого и обратного мартенситного переходов на изменение свойств сплава при термоциклировании под постоянным напряжением или в режиме работы привода. Показано, что уменьшение доли, как прямого, так и обратного переходов понижает величину необратимой деформации и стабилизирует функциональные свойства

сплава NiTi при термоциклировании. Установлено, что максимальное подавление пластической деформации и наилучшая термоциклическая стабильность наблюдается в том случае, если при охлаждении исключена вторая половина прямого перехода, что указывает на то, что именно в этом интервале происходят процессы, приводящие к увеличению плотности дефектов. Показано, что уменьшение доли прямого перехода при термоциклировании способствует лучшей стабилизации свойств сплава NiTi, чем уменьшение доли обратного перехода.

В третьей главе рассмотрено влияние различных факторов, таких как способ взведения привода, жёсткость упругого контртела, предварительное упрочнение аустенитной фазы, реализуемой доли производимой работы, положения температурного интервала термоциклирования относительно температур фазового превращения на изменение свойств сплава NiTi, работающего в режиме силового привода. Показано, что связь между максимальным реактивным напряжением и деформацией, восстановленной при нагревании сплава NiTi в режиме привода является нелинейной. Установлено, что при больших жесткостях контртела увеличение реактивного напряжения прекращается, как только его величина достигнет напряжения течения аустенитной фазы. Это приводит к тому, что работа, совершаемая сплавом при нагревании, с ростом жесткости контртела изменяется немонотонно. 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. 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 работы 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 результатов исследования. В рамках диссертационной работы впервые исследовано влияние изотермических выдержек на восстановление температур и последовательности мартенситных превращений в сплаве NiTi, подвергнутого термоциклированию. Впервые установлена взаимосвязь между изменением плотности дефектов и температурами мартенситных переходов. Впервые исследованы особенности движения межфазных границ при мартенситном превращении в сплаве NiTi до и после предварительного деформирования в мартенситной фазе. Показано, что в отожженном сплаве не наблюдается микроструктурной памяти и не соблюдается последовательность появления кристаллов мартенсита при охлаждении и их исчезновения при нагревании. Впервые установлено влияние долей прямого и обратного переходов, включенных в интервал

термоциклирования, на изменение функциональных свойств сплава NiTi при термоциклировании под напряжением или в режиме функционирования силового привода. Впервые установлено, что диаграмма «реактивное напряжение-обратимая деформация» является нелинейной. Установлено влияние положения максимальной и минимальной температур в цикле относительно температур мартенситного перехода на изменение функциональных свойств сплава NiTi при термоциклировании в режиме привода. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных температурных, деформационных и силовых условий термоциклирования сплава NiTi при которых изменение его свойств минимально.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что в работе получены новые фундаментальные знания о взаимосвязи плотности дефектов, с одной стороны, и температур мартенситных переходов, обратимой и необратимой деформации и реактивных напряжений, с другой стороны, при термоциклировании сплава NiTi в различных режимах. Установлена связь между долей прямого и обратного переходов, реализуемых в интервале термоциклирования, и стабильностью функциональных свойств сплава NiTi. Полученные результаты послужат основой для разработки новых моделей описания и прогнозирования изменения свойств сплавов с памятью формы при термоциклировании, учитывающих связь между дефектной структурой материала, долей превращенного сплава, и его функциональными свойствами. Такие модели могут быть использованы для расчета рабочих характеристик приводов и устройств многократного действия.

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

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательской деятельности таких научных учреждений, как Институт проблем машиноведения РАН, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, а также в научно-образовательной деятельности таких вузов, как Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербургский государственный университет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Новосибирский государственный университет, Южный федеральный университет и других.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обоснована применением современного оборудования для экспериментальных исследований, использованием апробированных методик исследования, соответствием полученных результатов представлениям, имеющимся в данной области научных исследований.

Публикации по диссертационной работе. Основные результаты по теме диссертации изложены в 33 работах, из которых 17 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, в WoS и Scopus (7 статей издано в журналах, входящих в Q1 согласно SJR).

Замечания по содержанию и оформлению, общая оценка диссертации

По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В работе не приведены результаты моделирования изменения свойств сплавов с памятью формы при термоциклировании и не описаны модели, которые могут быть использованы для выполнения таких расчетов.
2. Исследования стабильности свойств сплава TiNi проведены в режиме кручения. Известно, что при таком виде нагружения распределение напряжений неоднородно по сечению образца. Из текста диссертации неясно, как неоднородное распределение напряжений и деформации по сечению образца повлияло на результаты исследования.
3. В работе отмечено, что в сплаве NiTi не наблюдается соответствия между последовательностями образования кристаллов мартенсита при охлаждении и их исчезновении при нагревании. Оказывает ли данный факт какое-либо влияние на функциональные свойства самого сплава?
4. В тексте указано, что максимальная величина работы в сплаве TiNi составляет 10 МДж/м³, однако в результатах исследований максимальная работа равна 1 МДж/м³. В чем причины различия в 10 раз максимальной работы в одном и том же сплаве.
5. Можно ли регулировать скорость мартенситного перехода и, соответственно, скорость срабатывания привода? Справедливо ли утверждение, что относительно большое устройство не может сработать мгновенно в силу времени, необходимого на прогрев рабочего тела?

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Сибирева А.В., посвященной решению важной проблемы механики и физики функциональных материалов с эффектом памяти формы. Работа направлена на разработку научно обоснованных методов повышения термоциклической стабильности функциональных свойств сплавов на основе NiTi. В исследовании подробно изучены закономерности изменения деформации и генерируемых усилий в процессе термоциклирования сплава NiTi в различных температурно-силовых режимах. Полученные результаты легли в основу разработки оптимальных режимов рабочего цикла для привода на основе NiTi, который демонстрирует высокую стабильность характеристик при многократных

температурных циклах. Таким образом, диссертация Сибирева А.В. «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы» представляет собой законченное научное исследование, имеющее важное значение для механики материалов с фазовыми превращениями.

Заключение. Представленная к защите диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Сибирев Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Материалы докторской диссертации Сибирева А.В. «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы» заслушаны и получили одобрение на семинаре по механике ИПМаш РАН, основанном Д.А. Индейцевым, 23 сентября 2024 года, протокол № 6/24.

Отзыв на диссертацию Сибирева А.В. заслушан, обсужден и одобрен на заседании лаборатории механики наноматериалов и теории дефектов ИПМаш РАН, протокол № 10/10/24 от 10 октября 2024 года.

Ведущий научный сотрудник лаборатории
механики наноматериалов и теории дефектов

ИПМаш РАН, д.ф.-м.н.

Скиба Н. В.

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Почтовый адрес: 199178, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров,
Большой проспект, д. 61
Телефон: +7 812 3214778
Адрес электронной почты: ipmash@ipme.ru
Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://ipme.ru>



Скиба Н.В.

Помощник директора

Дир. / Андреева С.И.

19 октября 2024 г.