

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Сундеева Романа Вячеславовича на диссертацию Сибирева Алексея Владимировича на тему «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность темы диссертационного исследования

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) обладают уникальным комплексом механических и физико-химических свойств, что позволяет применять их в различных отраслях промышленности: в медицине (например, в стентах и имплантатах), в аэрокосмической и автомобильной промышленности (для облегчения конструкции и повышения прочности), а также в приборостроении и робототехнике для создания силовых приводов. Наибольшее распространение, среди данного класса материалов, получили сплавы на основе TiNi благодаря высоким значениям прочности, пластичности, параметров эффекта обратимой памяти формы, сопротивления усталостному разрушению и коррозионной стойкости. Известно, что термоциклирование сплавов на основе TiNi приводит к изменению их функциональных свойств, что является препятствием для широкого применения их в качестве материалов для создания силовых приводов. Поэтому диссертационная работа Сибирева А.В., направленная на исследование закономерностей изменения деформации и генерируемых усилий при термоциклировании сплава TiNi в неполном интервале температур мартенситных переходов при различных напряжениях для разработки оптимальных температурных, деформационных и силовых параметров рабочего цикла привода из сплава TiNi, демонстрирующего высокую стабильность параметров при многократных теплосменах, обладает **актуальностью**, как с практической, так и с научной точки зрения.

Структура и основное содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, общих выводов и списка цитируемой литературы, включающего 160 источников. Работа изложена на 197 страницах, содержит 86 рисунков и 5 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, указ личный вклад автора, описаны структура и объем диссертации.

В первой главе рассмотрена взаимосвязь между изменением плотности дефектов при термоциклировании и изменением функциональных свойств сплава TiNi (температур мартенситного перехода, обратимой и необратимой деформации, полезной работы).

Во второй главе исследовано влияние доли температурного интервала прямого и обратного переходов в сплаве TiNi на изменение температур мартенситных переходов, обратимой и пластической деформации и совершаемой при нагревании работы при термоциклировании под постоянным напряжением.

В третьей главе проведено систематическое исследование изменения функциональных свойств сплава TiNi при термоциклировании в режиме привода в зависимости от различных факторов: жёсткости упруго контртела, способа взведения привода, реализуемой доли работоспособности, относительного положения

температурного интервала термоциклирования, предварительного упрочнения аустенитной фазы.

Научная новизна результатов, изложенных в диссертации

1. Впервые исследовано влияние изотермических выдержек на восстановления температур и последовательности мартенситных превращений в сплаве TiNi, подвергнутого термоциклированию. Показано, что влияние температуры и длительности выдержки на восстановление температур мартенситных переходов обусловлено процессами возврата, которые происходят тем интенсивнее, чем выше температуры перехода. Показано, что выдержка в мартенситном состоянии понижает плотность дефектов и приводит к восстановлению температур мартенситных переходов.

2. Впервые установлена взаимосвязь между изменением плотности дефектов и температурами мартенситных переходов. Показано, что на зависимости температур переходов от плотности дефектов можно выделить нелинейный участок на начальной этапе термоциклирования и последующий линейный участок. Предположено, что нелинейная зависимость температур мартенситных переходов от плотности дефектов обусловлена тем, что на начальном этапе термоциклирования на температуры переходов влияет не только плотность дефектов, но и их распределение.

3. Впервые исследованы особенности движения межфазных границ при мартенситном превращении в сплаве TiNi после отжига 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. Установлено, что дислокационная структура, сформированная в результате деформации, является стабильной при повторяющихся превращениях, поэтому при мартенситных переходах в деформированных образцах наблюдается микроструктурная память, а последовательность исчезновения мартенситных кристаллов при нагревании является обратной к последовательности их появления при охлаждении.

4. 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 привода. Показано, что при термоциклировании сплава TiNi необратимая деформация преимущественно накапливается во второй половине прямого перехода. Для подавления необратимой деформации и стабилизации свойств при термоциклировании под постоянным напряжением необходимо исключить вовлечение второй половины прямого перехода из температурного цикла. В случае термоциклирования в режиме привода, достаточно исключить из температурного интервала термоциклирования последние 10 % прямого перехода при охлаждении, чтобы уменьшить необратимую деформацию в 5 раз.

5. Впервые установлено, что уменьшение доли прямого перехода при термоциклировании более эффективно для подавления пластической деформации и улучшения стабильности функциональных свойств сплава TiNi, чем уменьшение доли обратного перехода. Это связано с тем, что плотность дефектов интенсивно нарастает именно при прямом переходе, и ограничение доли этого перехода позволяет замедлить процесс накопления дефектов при термоциклировании. При обратном переходе плотность дислокаций уменьшается за счет активации процессов возврата, что облегчает увеличение плотности дефектов при следующем охлаждении.

6. Впервые установлено, что диаграмма «реактивное напряжение-обратимая деформация» является нелинейной. Это обусловлено тем, что при высоких жесткостях

контртела реактивное напряжение возрастает только до величины напряжения течения аустенитной фазы.

7. Впервые установлено влияние положения максимальной и минимальной температур в цикле относительно температур мартенситного перехода на изменение функциональных свойств сплава TiNi при термоциклировании в режиме привода. Показано, что для стабилизации свойств сплава необходимо выбирать минимальную температуру такой, чтобы максимально исключить реализацию второй половины прямого перехода при охлаждении, а максимальная температура цикла должна быть меньше температуры окончания обратного превращения, чтобы подавить процессы возврата.

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

9. Разработанные рекомендации по выбору оптимальных температурных, деформационных и силовых условий термоциклирования сплава TiNi апробированы при работе торсионного привода многократного действия в течение 1000 циклов. Показано, что при выбранных оптимальных параметрах цикла, изменения характеристик привода минимальны по сравнению с термоциклированием в полном интервале температур переходов.

Практическая и теоретическая значимость работы. В диссертации подробно и систематически изучены особенности структурных процессов изменения функциональных свойств сплавов с ЭПФ на основе TiNi при термоциклировании в неполном интервале температур мартенситных переходов при различных напряжениях. Полученные результаты позволят сформировать физически корректные основы для выбора рабочих характеристик устройств при термоциклировании.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в научных и производственных организациях России (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ИФТТ РАН, ИМЕТ РАН, ИФМ УрО РАН и др.), а также в учебном процессе ведущих высших учебных заведений РФ (МГУ, НИТУ «МИСиС», СПбГУ, НИЯУ МИФИ и др.).

Достоверность полученных результатов. Достоверность представленных в диссертационной работе результатов и сделанных выводов не вызывает сомнения благодаря корректному применению современных высокоэффективных структурных методов исследования и изучения физико-механических свойств, а также глубоким многоуровневым анализом полученных результатов в полном соответствии с современными концепциями физики конденсированного состояния. Результаты и выводы диссертации были апробированы на многочисленных российских и международных конференциях и опубликованы 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). Всего автором опубликовано 61 работа из них 28 работ в реферируемых зарубежных и 16 отечественных журналах, цитируемых базами данных Scopus, Web of Science и РИНЦ.

Замечания по диссертационной работе.

1. В разделе 1.1.2 автор диссертации исследует влияние верхней температуры термоцикла на обратимое изменение кинетики мультистадийных превращений в эквиатомном сплаве TiNi. Для того чтобы определить параметры каждого пика на ДСК кривой автор использовал ПО Origin Pro Peak Analyzer, с помощью которой

аппроксимировал каждый пик на ДСК кривой функцией Лоренца (рисунок 10). Из текста диссертации не понятно на чем основан выбор для аппроксимации пиков функцией Лоренца, а не функцией Фойгта? Энтальпию пиков автор вычислял как площадь под соответствующим пиком. Возникает вопрос, с какой погрешностью была определена величина энтальпии пиков т.к. большой вклад в ошибку при аппроксимации вносит методика определения начала и конца пика на ДСК кривой (на графике на рисунке 11 не представлена погрешность определения величины энтальпии)?

2. Не понятно утверждение автора, что в эквиатомном сплаве TiNi не представляется возможным оценить плотность дефектов по уширению пиков на рентгенограммах или напрямую на изображениях, полученных в колонне просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) (стр. 46). Для мартенситной фазы B19' на рентгенограмме можно наблюдать отдельные дифракционные линии, которые позволяют провести анализ их уширения (рис. 1 отзыва). Также не понятно в чем заключается сложность контраста, который дает мартенситная фаза при ПЭМ исследованиях, для определения плотности дефектов?

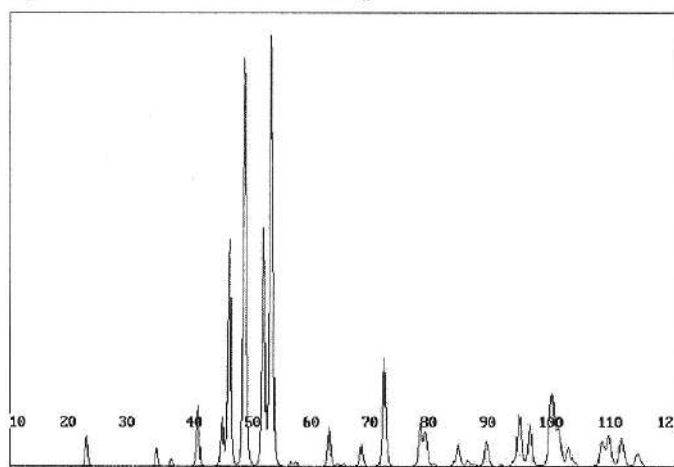


Рис. 1 – Рентгенограмма мартенситной фазы B19'.

3. В диссертации справедливо утверждается, что не только плотность дефектов, но и их распределение оказывает влияние на изменение параметров ЭПФ при термоциклировании. При этом дислокационная структура в сплаве TiNi при термоциклировании методом ПЭМ практически не изучена.

4. В работе встречаются опечатки и стилистические ошибки, а также не всегда понятная терминология, например, не очень понятен термин «активная деформация» или «активное растяжение».

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация написана четким, грамотным, физически корректным языком, оформлена в полном соответствии с установленными требованиями. Содержание диссертации отражено в многочисленных публикациях в рецензируемых отечественных и зарубежных периодических изданиях, материалах и трудах конференций. Публикации диссертанта правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертация Сибирева Алексея Владимировича на тему: «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых

характеристик сплава NiTi с памятью формы» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Сибирев Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета
Доктор физико-математических наук
(1.3.8 физика конденсированного состояния)
Доцент
Кафедра нанoeлектроники
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА - Российский технологический университет»
119454 г. Москва, проспект Вернадского, д. 78
Адрес электронной почты: sundeev55@yandex.ru



Р.В. Сундеев

06.11.2024 г.

Согласен на обработку персональных данных

Подпись Р.В. Сундеева заверяю

Ученый секретарь РТУ МИРЭА



Н.В. Милованова