

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Прониной Юлии Григорьевны
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 исследования

Сплавы с памятью формы (СПФ) – это уникальные материалы, способные восстанавливать деформацию при разгрузке (сверхупругость) или нагреве (эффект памяти формы). Проявления данных эффектов связаны с термоупругими мартенситными превращениями. СПФ широко используются для производства космической техники, в авиастроении, медицине и микроэлектронике. В частности, СПФ применяются для создания таких устройств многократного действия как термосиловые приводы и тепловые двигатели. Приводы на основе СПФ обладают рядом преимуществ: простая конструкция, меньший вес и объём, плавное и надёжное срабатывание, очень высокая удельная работоспособность по сравнению с электрическими двигателями, и при этом они не подвержены воздействию агрессивных сред. Для обеспечения надёжной работы устройств необходимо, чтобы параметры привода оставались стабильными при многократном срабатывании. Однако СПФ на основе никелида титана демонстрируют низкую стабильность функциональных свойств при многократных циклах, что ограничивает их применение. Для того чтобы повысить термоциклическую стабильность свойств этих сплавов, необходимо иметь детальное представление о механизмах деформирования СПФ, об особенностях накопления пластической деформации и изменении величин эффектов памяти формы и реактивных напряжений при термоциклировании в различных условиях. Поэтому задача разработки методов повышения термоциклической стабильности свойств сплавов с памятью формы на основе TiNi является важной как с теоретической, так и с практической точек зрения. Именно этим актуальным вопросам и посвящена представленная диссертационная работа.

Научная новизна работы

К наиболее значимым новым результатам работы можно отнести следующие.

В рамках работы получены новые знания о механизмах деформирования сплавов с памятью формы, установлены причины термоциклической нестабильности свойств сплавов с эффектом памяти формы на основе NiTi, получены новые зависимости изменения функциональных свойств при термоциклировании. Установлено, что выдержка предварительно термоциклированного сплава NiTi, как в свободном состоянии, так и под постоянным напряжением, при различных температурах – в мартенситном или аустенитном состоянии – и увеличение максимальной температуры в цикле способствуют увеличению температур мартенситного перехода. Это влияет на обратимую и необратимую деформацию, что связано с процессами возврата, изменяющими плотность и распределение дефектов. Выявлена нелинейная зависимость между плотностью дефектов и изменением температур мартенситных превращений в сплаве NiTi при многократных теплосменах. Установлено, что в отожженном сплаве NiTi последовательность исчезновения мартенситных кристаллов при нагревании не совпадает с их появлением при охлаждении,

что указывает на отсутствие микроструктурной памяти. При этом в образцах, подвергнутых активному деформированию в мартенситном состоянии, дислокационная структура создает устойчивое поле внутренних напряжений, что поддерживает микроструктурную память.

Определено, что уменьшение доли прямого мартенситного перехода снижает накопление необратимой деформации и стабилизирует функциональные свойства сплава NiTi при термоциклировании как под постоянным напряжением, так и в режиме привода, в котором напряжение уменьшается при охлаждении и возрастает при нагревании. Впервые показано, что наибольшее увеличение плотности дефектов наблюдается во второй половине прямого перехода при охлаждении, поэтому исключение этого температурного интервала при термоциклировании позволяет существенно повысить термоциклическую стабильность свойств сплава TiNi.

Впервые установлена нелинейная связь между реактивным напряжением и деформацией при нагревании сплава NiTi в режиме привода. Показано, что при больших жесткостях контртела реактивное напряжение ограничено напряжением дислокационного течения аустенитной фазы. Установлено, что положение минимальной и максимальной температур цикла относительно температур мартенситного перехода оказывает влияние на функциональные свойства и накопление необратимой деформации в сплаве NiTi, поскольку позволяют исключить температурные интервалы, в которых накапливается необратимая деформация при охлаждении и нагревании. Определено оптимальное положение температур цикла, при котором работа сплава максимальна, а накопление пластической деформации минимально.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обоснована применением современного исследовательского оборудования и апробированных методик исследования, а также соответствием полученных результатов и сделанных выводов общепринятым физическим представлениям и имеющимся данным исследований других авторов.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость результатов исследования состоит в выявлении новых фундаментальных знаний о влиянии плотности дефектов на температуры мартенситных переходов, обратимую и необратимую деформацию, а также реактивные напряжения при термоциклировании сплава NiTi. Установлена связь между долей прямого и обратного переходов и стабильностью функциональных свойств сплава, что позволит создать модели прогнозирования изменений свойств сплавов с памятью формы. Эти модели помогут рассчитывать рабочие характеристики приводов и многократно используемых устройств. Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций для инженеров по выбору оптимальных силовых, деформационных и температурных режимов работы приводов на основе сплавов NiTi, что минимизирует изменения их функциональных свойств при термоциклировании.

Оценка содержания и оформления диссертации

Содержание диссертационной работы является логичным и последовательным. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, 86 рисунков, 5 таблиц, библиографии из 160 наименований. Объем диссертации составляет 197 страниц.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обоснована его актуальность и новизна. В первой главе показано, что при термоциклировании сплава NiTi интенсивность процессов возврата влияет на кинетику мартенситных переходов, величины деформационных эффектов и дефектную структуру кристаллического строения сплава. Отдельно стоит отметить *уникальные in-situ исследования движения межфазных границ*, выполненные в колонне просвечивающего электронного микроскопа. В результате данных исследований установлено, что в отожженном сплаве NiTi последовательность превращений нарушается из-за изменения дефектной структуры, тогда как в предварительно деформированном сплаве наблюдали явление “микроструктурной памяти” благодаря устойчивому полю внутренних напряжений. Во второй главе исследовано влияние долей прямого и обратного мартенситных переходов на стабильность свойств сплава при термоциклировании. *Наиболее важным результатом* главы представляется установленный факт, что уменьшение доли переходов стабилизирует свойства и снижает необратимую деформацию. Максимальная стабильность достигается при исключении второй половины прямого перехода, поскольку в этом интервале внутренние напряжения могут аккомодировать только в результате пластической деформации. В третьей главе рассмотрено влияние жёсткости системы «рабочее тело–упругое контр-тело», способа предварительного взведения, реализуемой доли превращения и выбора интервала термоциклирования на работу сплава NiTi в режиме привода. Показано, что связь между реактивным напряжением и деформацией нелинейна, а жёсткость контр-тела влияет на работу сплава. Максимальная работа наблюдается при жёсткости 6-10 ГПа. *Особую ценность* имеют сформулированные практические рекомендации для поиска оптимального интервала термоциклирования сплава NiTi в режиме привода. Показано, что оптимальный интервал термоциклирования, в котором минимизируются изменения свойств и пластическая деформация, следует выбирать так, чтобы нижняя граница термоцикла была максимально удалена от температуры завершения прямого превращения, а верхняя граница была ниже температуры завершения обратного перехода.


Вопросы и замечания по содержанию и оформлению работы

1. Во введении приводятся данные прогноза рынка СПФ с 2022 по 2027 гг. со ссылкой на сайт [10] без указания даты составления прогноза (и последнего доступа к сайту). Интересно узнать, когда был составлен этот прогноз.
2. В диссертации не освещены вопросы моделирования СПФ. Проводились ли попытки молекулярного или многомасштабного моделирования фазовых превращений с учетом плотности дислокаций?
3. На стр. 30 говорится, что на рис. 1 приведены зависимости удельного сопротивления от температуры в интервале 200-0°C. Однако на самом рисунке приведены данные только от 0 до 100°C. Почему? Интересно увидеть полные зависимости. Для чего производилось термоциклирование до 200 °C, если температуры начала и конца прямого и обратного превращений ниже 100 °C?
4. Не понятно описание рис. 2b: Изменение электросопротивления, измеренного после выдержек при температуре 120 °C. (Именно его изменение было измерено одновременно?, изменение относительно чего?). Если выдержка проводилась при 120 °C, то какое отношение к этому имеет дальнейшее описание рисунка с указанием выдержек при температурах выше и ниже 200 °C?

5. Второе предложение под рис. 7 сформулировано некорректно, хотелось бы узнать его смысл.
6. Выполняются ли для никелида титана условия, принятые при выводе соотношения между изменением удельного сопротивления и изменением плотности дислокаций в работе [102]? Можно ли считать скольжение дислокаций консервативным? Насколько правомерно использовать коэффициент ρ^* в (1.3), полученный на основе данных из работы [48], для образцов, исследуемых в данной работе?
7. Кажется неубедительным обоснование возможной причины роста объемной доли ориентированных кристаллов мартенсита при высокотемпературных выдержках тем, что интенсификация процессов релаксации приводит к увеличению внутренних напряжений (стр. 82-83).
8. Желательно дать пояснения к заключительному предложению п. 1.3 об «управлении вкладом разупрочнения в процесс увеличения плотности дефектов».
9. Почему нелинейная зависимость изменения температур мартенситных переходов указывает на то, что существуют дополнительные факторы, вызывающие изменение температур при термоциклировании? Обсуждаемые зависимости обязаны быть линейными на любых интервалах?
10. При изменении внешнего напряжения от 50 до 200 МПа качественно меняются зависимости температур мартенситных переходов от плотности дефектов. Однако в работе не проводили исследований изменения свойств при других значениях действующих напряжений. Чем обусловлен выбор именно таких напряжений (50 и 200 МПа)?
11. К сожалению, в работе достаточно часто встречаются опечатки.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

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 А.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по 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, доцент,
профессор, заведующий кафедрой вычислительных
методов механики деформируемого тела
Санкт-Петербургского государственного университета,  Пронина Ю.Г.

16 октября 2024 г.

