



«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора ИМАШ РАН

(О.И. Косарев)

«14» _____ 2014г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Сибирева Алексея Владимировича «Необратимая деформация при многократной реализации эффекта памяти формы в сплаве TiNi», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Сплавы с эффектом памяти формы широко используются в различных отраслях техники в качестве термомеханических приводов многократного действия. В таких устройствах элементы из сплавов с эффектом памяти формы подвергаются многократным теплосменам в интервале температур мартенситных превращений и демонстрируют обратимое изменение деформации, которая обусловлена реализацией термоупругих мартенситных превращений. В то же время при многократном повторении превращений под нагрузкой в сплавах происходит накопление необратимой деформации в направлении действия силы. Это приводит к изменению геометрических размеров рабочего элемента, деградации функциональных свойств материала, изменению температур срабатывания элементов. Как следствие ухудшаются рабочие характеристики устройства. Несмотря на то, что явление накопления необратимой деформации при термоциклировании сплавов с эффектом памяти формы известно давно, этот процесс до сих пор недостаточно изучен: не установлены механизмы, ответственные за возникновение необратимой деформации; не развиты методы математического описания изменения функциональных свойств сплавов с эффектом памяти формы при термоциклировании. Поэтому диссертационная работа А.В. Сибирева, посвященная экспериментальному и теоретическому исследованию процесса накопления необратимой деформации при многократном термоциклировании сплава TiNi с эффектом памяти формы, является актуальной.

В работе получены новые данные об изменении функциональных свойств сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ с памятью формы при термоциклировании в различных термо-силовых режимах. Установлено, что термоциклирование сплава в ненапряженном состоянии приводит к изменению температур и последовательности мартенситных превращений, кроме этого наблюдается изменение стадийности выделения тепла при прямом переходе. Автор связывает это с тем, что при термоциклировании в сплаве возникают области с высокой и низкой плотностью дефектов. В работе показано, что поскольку изменение плотности дефектов приводит к изменению упругой энергии в сплаве, которая, в свою очередь, влияет на параметры мартенситных превращений, то различие в параметрах мартенситных превращений (температур и последовательности) в областях с высокой и низкой плотностью дефектов обусловлено различием упругой энергии в этих объемах.

В работе также исследовано изменение функциональных свойств сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ при термоциклировании под различным напряжением через различную долю температурного интервала мартенситных превращений. Анализ изменения необратимой деформации и удельного электросопротивления при термоциклировании под напряжением позволил установить, что накопление необратимой деформации происходит, в основном, при охлаждении под напряжением. Это обусловлено тем, что в сплаве появляются благоприятные кристаллы мартенсита, при возникновении которых происходит сдвиг сонаправленный с действующей нагрузкой. Доля этих кристаллов оказывается больше доли каждого из остальных вариантов мартенсита, что, в свою очередь, приводит как к возникновению некомпенсированной фазовой деформации, проявлению эффекта пластичности превращения, появлению некомпенсированной необратимой деформации.

В работе установлено, что в зависимости от уровня приложенных напряжений и доли прямого перехода меняется механизм появления благоприятных кристаллов мартенсита при охлаждении. Показано, что если величина приложенного напряжения оказывается выше предела переориентации мартенситных кристаллов, то на начальном этапе прямого превращения в сплаве появляются как благоприятные, так и неблагоприятные кристаллы мартенсита, однако на завершающем этапе превращения неблагоприятные кристаллы дополнительно переориентируются и становятся благоприятными. Таким образом, по завершению прямого превращения большая часть мартенситных кристаллов оказывается переориентированной в направлении действующей нагрузки. Утверждается, что именно процесс дополнительной переориентации мартенситных кристаллов, который имеет место на завершающей стадии прямого мартенситного превращения, является причиной известного явления - интенсивного

накопления необратимой деформации в сплавах с памятью формы при термоциклировании под высокими напряжениями.

В работе экспериментально установлено, что при нагревании сплава $Ti_{50}Ni_{50}$ наблюдается эффект разупрочнения, который влияет на изменение функциональных свойств и накопление необратимой деформации при термоциклировании. Показано, что действие разупрочнения тем существеннее, чем большая доля материала претерпевает обратное мартенситное превращение. Обнаружено, что в том случае, когда степень разупрочнения невелика (если при нагревании менее 75 % объема сплава претерпевает обратное превращение), функциональные свойства оказываются стабильными при термоциклировании, а скорость накопления необратимой деформации становится равной нулю. Таким образом, Сибиревым А.В. впервые получено экспериментальное подтверждение гипотезы о том, что при обратном превращении в никелиде титана происходит разупрочнение.

В своей работе Сибирев А.В. модернизировал закон изменения критического значения силы микропластического течения, используемый в существующей модели структурно-аналитической теории прочности, за счет введения нелинейной связи между текущим значением силы микроскопического течения и величиной упрочнения. Это позволило адекватно описать полученные в работе экспериментальные результаты и получить хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными. Таким образом, проведенная модернизация позволила существенно расширить границы применимости модели и получить инструмент прогнозирования изменения функциональных свойств и накопления необратимой деформации в сплаве $TiNi$ при многократных теплосменах.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик, глубоким анализом экспериментальных данных, использованием разработанной и апробированной модели описания функциональных свойства сплавов с эффектом памяти формы и хорошим соответствием между расчетными и экспериментальными данными.

Все полученные данные являются новыми и представляют большое значение для механики материалов с фазовыми превращениями и развития методов описания свойств таких материалов.

Полученные результаты имеют практическую значимость для инженеров, разрабатывающих устройства многократного действия на основе сплавов с эффектом

памяти формы, поскольку позволяют определять режимы работы устройств, минимизирующие изменение свойств материалов при многократных теплосменах.

Выводы, сделанные в работе, отражают содержание диссертации. Основные результаты, полученные в работе, опубликованы в трех научных журналах из перечня ВАК, в том числе и в зарубежных журналах, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science, а также хорошо апробированы на Российских и зарубежных конференциях.

По содержанию диссертационной работы можно сделать следующие **замечания**:

1. В главе 2 отсутствует обоснование выбора состава материала исследования.

2. В работе рассматривается влияние термоциклирования на изменение функциональных свойств сплава TiNi с памятью формы. Вместе с тем, все экспериментальные исследования проведены на базе 30 термоциклов. Непонятно применимы ли полученные результаты для описания изменения функциональных свойств и необратимой деформации в сплавах на основе TiNi при большем количестве циклов? В реальных устройствах количество многократных теплосмен может составлять от нескольких тысяч до нескольких миллионов циклов.

3. В работе получено экспериментальное подтверждение того, что при обратном переходе в никелиде титана происходит разупрочнение. Этот результат был получен при анализе данных полученных, при термоциклировании под напряжением. Вместе с тем, неясно происходит ли этот процесс при термоциклировании в ненапряженном состоянии, когда не происходит накопления необратимой деформации.

4. Одним из выводов работы является тот факт, что при термоциклировании сплава Ti₅₀Ni₅₀ в ненапряженном состоянии увеличение плотности дефектов происходит неоднородно, что и является причиной того, что в различных областях сплава реализуются различные мартенситные превращения при различных температурах. Однако, в работе не представлены структурные подтверждения возможности неоднородного распределения дефектов в сплаве.

5. В разделе 3.3 единицей измерения силы микропластического течения F_0^y является МДж. Из текста не ясно, почему величину силы не измеряли в Ньютонах, как это принято в системе СИ.

Несмотря на замечания, диссертацию А.В. Сибирева следует считать законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне и имеющей важное научное и практическое значение. А.В. Сибирёв продемонстрировал высокую научную квалификацию, владение многими экспериментальными методами исследования

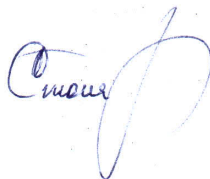
материалов, прекрасную теоретическую подготовку. Диссертационная работа соответствует п. 9 паспорта специальности 01.02.04, удовлетворяет критериям, предъявляемым к написанию научных работ. Работа написана технически грамотным языком, стиль изложения доказательный. Автореферат отражает содержание диссертации, формулировка основных результатов и выводов в автореферате и диссертации идентичны.

Диссертационная работа А.В. Сибирёва удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а сам соискатель заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв составлен главным научным сотрудником лаборатории узлов трения для экстремальных условий д.т.н., проф. В.В. Столяровым и заведующим лабораторией исследования биомеханических систем д.ф.-м.н. С.В. Петуховым.

Заключение принято на внеочередном расширенном заседании семинара по ТММ имени И.И. Артоболевского 29.09.2014г. На заседании присутствовало 15 человек. Результаты голосования: «ЗА» - 15 чел., «ПРОТИВ» - нет, «ВОЗДЕРЖАЛСЯ» - нет.

г.н.с., лаборатории узлов трения для
экстремальных условий
д.т.н., проф.



В.В. Столяров

зав. лабораторией исследования
биомеханических систем
д.ф.-м.н.



С.В. Петухов

руководитель семинара
д.т.н., проф.



В.А. Глазунов