

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 132 страницах, включая 68 рисунков и 3 таблицы и список литературы из 116 источников.

Актуальность.

Необычное механическое поведение материалов с эффектом памяти формы обусловлено реализацией так называемых обратимых механизмов неупругого деформирования. Прежде всего, к таким механизмам следует отнести фазовое превращение мартенситного типа. При охлаждении кристаллического материала в превращенных областях происходит сдвиг, связанный с появлением мартенситных кристаллов. При нагревании через температурный интервал обратного превращения исчезновение мартенситных кристаллов сопровождается восстановлением деформации. Другим обратимым механизмом деформирования является переориентация при нагружении структурных доменов низкотемпературной фазы (мартенсита). Эти механизмы деформации ответственны за проявление эффектов памяти формы, пластичности превращения, псевдоупругости в материалах с мартенситными превращениями. В то же время, эксперименты показывают, что в сплавах с памятью формы наряду с обратимыми механизмами неупругой деформации реализуется и необратимая (дислокационная) пластичность. Ее вклад в общую деформацию материала при фазовом переходе невелик, но становится существенным, когда превращения под нагрузкой повторяются многократно, что часто происходит в устройствах, использующих сплавы с эффектом памяти формы. В результате развития необратимой деформации при термоциклировании материалов с памятью формы под нагрузкой происходит необратимой изменение геометрических размеров образцов и деградация их функциональных свойств. Несмотря на наличие экспериментальных наблюдений подобных изменений, в настоящее время остаются неизвестными причины и основные закономерности накопления пластической деформации при термоциклировании через интервал фазовых превращений, что не позволяет надежно описать и прогнозировать механическое поведение материалов. В связи со сказанным тема диссертационной работы Сибирева А.В., посвященной экспериментальному исследованию и развитию теоретических методов описания процессов накопления необратимой деформации при многократных теплосменах сплава TiNi через температурный интервал фазовых

превращений, представляется очень актуальной. Это подтверждается тем, что часть работы выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (№ 8761 от 4 октября 2012 года)

Основные научные результаты и их новизна.

В работе выполнен большой объем экспериментальных исследований изменения необратимой деформации при многократных теплосменах сплава TiNi в различных температурно-силовых режимах. Для этого разработаны новые методики, позволяющие проводить термоциклирование сплавов через различную долю температурного интервала прямого или обратного мартенситного переходов. Кроме этого использованы методики, позволяющие получать информацию об изменении структурного состояния сплава (дифференциальная сканирующая калориметрия и измерение электросопротивления). Применение этих методик позволило получить новые данные об изменении функциональных свойств и необратимой деформации в сплаве TiNi при термоциклировании и установить закономерности накопления пластической деформации и изменения параметров эффектов памяти формы в зависимости от доли температурного интервала прямого и обратного мартенситных превращений и от уровня действующих напряжений.

В работе показано, что накопление необратимой деформации в сплаве происходит, в основном, на завершающем этапе прямого мартенситного перехода вне зависимости от уровня приложенных напряжений. Установлено, что накопление необратимой деформации является следствием возникновения при охлаждении кристаллов мартенсита с ориентацией, благоприятной по отношению к действующей силе. Обнаружено, что величина напряжения оказывает влияние на интенсивность накопления необратимой деформации, что связано с различием в механизмах появления благоприятно ориентированных кристаллов мартенсита. В работе впервые установлено, что при малых напряжениях (меньших предела переориентации мартенситных кристаллов) благоприятно ориентированные кристаллы возникают напрямую из аустенитной фазы, а при больших напряжениях, превышающих предел переориентации мартенситных кристаллов, благоприятно ориентированные кристаллы дополнительно образуются путем переориентации кристаллов мартенсита, что дополнительно вызывает накопление необратимой деформации.

В работе установлено, что при нагревании сплава TiNi происходит процесс разупрочнения, интенсивность которого зависит от доли материала, испытывшего превращение из мартенситной фазы в аустенитную. Показано, что скорость накопления необратимой деформации уменьшается с числом циклов и становится близкой к нулю в том случае, если при нагревании менее 75 % мартенситной фазы переходит в аустенитную. Это указывает на то, что в таком режиме сплав упрочняется при термоциклировании и, начиная с некоторого цикла, пластическая деформация не происходит. В том случае, если при нагревании более 75 % мартенситной фазы переходит

в аустенитную, скорость накопления необратимой деформации уменьшается с циклами, однако ее нулевое значение не достигается даже при большом количестве циклов. Следовательно, при таких режимах термоциклирования упрочнение сплава не происходит. Это обусловлено тем, что при нагревании сплава на завершающей стадии обратного превращения материал разупрочняется, и в результате, в каждом последующем цикле он способен накапливать дополнительную необратимую деформацию.

Экспериментальные результаты, полученные в работе, были использованы для верификации микроструктурной модели, основанной на структурно-аналитической теории прочности. Показано, что существующая модель не может адекватно описать изменение свойств сплава TiNi при термоциклировании при большом количестве циклов. Это связано с тем, что существующая модель не в полной мере учитывала процессы упрочнения и разупрочнения, происходящие в материале при многократных теплосменах. На основе экспериментальных данных, полученных Сибиревым А.В., в работе предложена модификация выражения для критического значения силы микропластического течения. Получены новые выражения для параметров модели, проведен подбор этих параметров и выполнен расчет изменения необратимой деформации и функциональных свойств сплава TiNi при многократных термоциклах в различных температурно-силовых режимах. Показано, что модификация микроструктурной модели с помощью нового закона изменения силы микропластического течения позволяет адекватно описать изменение свойств сплава при термоциклировании. Установлено, что модифицированная модель позволяет описать зависимость величины необратимой деформации от доли материала, претерпевшего превращение из аустенитной фазы в мартенситную, и учитывает зависимость накопленной необратимой деформации от величины напряжения. Таким образом, в работе установлено, что модифицированная модель позволяет успешно описать все основные закономерности изменения необратимой деформации при различных температурно-силовых режимах.

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

Достоверность результатов исследования

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик, всесторонним анализом полученных экспериментальных данных, использованием разработанной и апробированной микроструктурной модели, описывающей свойства сплавов с эффектом памяти формы, и хорошим соответствием между расчетными и экспериментальными данными.

Практическая значимость работы

Полученные результаты имеют практическую значимость, поскольку могут быть использованы для разработки устройств многократного действия на основе сплавов с

эффектом памяти формы и позволяют определять режимы работы, которые минимизируют изменение свойств материалов при многократных теплосменах.

Содержание и оформление работы

Содержание работы **соответствует специальности 01.02.04** – Механика деформируемого твердого тела. Работа написана хорошим языком и имеет ясную структуру. Выносимые на защиту положения являются обоснованными. Выводы, сделанные в работе, отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа **А.В. Сибирева** оформлена в соответствии с требованиями ВАК и представляет собой законченное научное исследование.

Автореферат диссертации отражает содержание диссертации, формулировка основных результатов и выводов в автореферате и диссертации идентичны.

По тексту диссертационной работы и автореферата можно сделать следующие **замечания:**

1. В работе рассматривается влияние термоциклирования на изменение функциональных свойств сплава TiNi с памятью формы. 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.

2. В работе утверждается о том, что при обратном фазовом превращении происходит разупрочнение материала, однако ни слова не говорится о механизме этого процесса.

3. Испытания выполнялись в условиях растяжения при постоянной нагрузке. Очевидно, что по мере удлинения образца с термоциклами напряжения изменялись, однако это не учитывалось при анализе результатов.

4. При описании методики выполнения экспериментов не указано в какой мере учитывался статистический разброс экспериментальных данных и производился ли контроль однородности деформации по длине проволоочного образца.

5. Диссертация содержит ряд погрешностей технического характера. В частности, на Рисунках 58 и 61 ось абсцисс подписана «Время», при этом не указаны единицы измерения.

Перечисленные замечания не снижают ценности выполненных исследований и во многом являются рекомендациями для будущей работы.

Представленную работу оцениваю как научно-квалификационную работу, вносящую существенный вклад в механику деформируемых твердых тел с фазовыми превращениями.

Основные результаты, полученные в работе, представлены в 10 научных публикациях, из которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 2 в зарубежных журналах, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science. Результаты достаточно полно апробированы на зарубежных и Российских конференциях.

А.В. Сибирев продемонстрировал высокую научную квалификацию, владение экспериментальными методиками исследования материалов и методами расчета свойств сплавов с памятью формы.

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Ее автор Сибирев Алексей Владимирович заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Доктор технических наук,
Профессор, заведующий кафедрой
«Соппротивление материалов»
ФГБОУ ВПО СПбГПУ
Санкт-Петербург, Политехническая 29
Тел.: (812) 5526303
e-mail: melnikovboris@mail.ru

Б.Е. Мельников

