

## ОТЗЫВ

официального оппонента Кашенко Михаила Петровича на диссертационную работу Леги Петра Викторовича «Термоупругий мартенситный переход и эффект памяти формы в сплаве  $Ti_2NiCu$  на микро- и наномасштабе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния

**Актуальность темы.** Диссертационная работа Леги Петра Викторовича посвящена решению актуальных задач физики конденсированного состояния, касающихся изучения проявления фазовых переходов и эффекта памяти формы в сплавах системы Ti-Ni на микро- и наноуровне. За последние 20 лет исследованию фазовых переходов 1-го рода на наноуровне и связанных с ним эффектов в различных материалах посвящено множество работ, причем с каждым годом количество подобных работ возрастает экспоненциально. Интерес к таким исследованиям в настоящее время стимулируется актуальной потребностью создания новых материалов.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 143 наименования. Полный объем диссертации составляет 127 страниц текста с 95 рисунками. Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы основные цели работы и изложены основные положения, выносимые на защиту. В первой и второй главе приводится обширный литературный обзор состояния исследований в данной научной области в настоящее время, и описываются стандартизованные и оригинальные экспериментальные и теоретические методики, используемые в работе, соответственно. Третья и четвертая главы содержат результаты экспериментальных и теоретических исследований. В заключении изложены наиболее важные результаты и выводы диссертационной работы.

**Научная новизна и достоверность.** В диссертационной работе впервые получен ряд важных новых результатов, имеющих как фундаментальное, так и



прикладное значение. В первую очередь, необходимо отметить, что работа характеризуется применением нового метода изучения мартенситных превращений и эффекта памяти формы (ЭПФ) на микро- и нано уровне с применением функциональных материалов на основе сплавов с ЭПФ, представляющих собой слоистую структуру, состоящую из упругого слоя и слоя с ЭПФ, причем последний псевдопластически деформирован на растяжение. Также отличительной положительной чертой работы является объяснение полученных оригинальных экспериментальных результатов новейшими методами компьютерного моделирования. С применением такого полного набора экспериментальных и теоретических методов **получены следующие наиболее интересные результаты.**

1. Предложена новая схема для экспериментального изучения проявления термоупругого мартенситного перехода и ЭПФ на микро- и наномасштабе размеров на основе слоистого композитного материала, включающего слой предварительно деформированного сплава с ЭПФ и слоя упругого металла.
2. Изготовлены образцы композитных микро- и наноструктур из быстрозакаленного сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ и слоя упругого металла (вольфрама и платины) методом фокусированного ионного пучка (ФИП) и изучены обратимые деформации композита с ЭПФ с субмикронной толщиной активного слоя. Продемонстрирован ЭПФ на образцах двуслойных микро- и наноактюаторов вплоть до толщин функционального слоя 80 нм. *In situ* в ПЭМ изучена перестройка фазового состава и механические обратимые деформации, индуцированные термоциклированием в слоистых композитах на основе  $Ti_2NiCu$  толщиной 80 нм. При дальнейшем уменьшении толщины функционального слоя ЭПФ не проявляется.
3. Экспериментально показано, что в сплаве  $Ti_2NiCu$  при уменьшении толщины функционального слоя менее 100 нм температура образования фазового превращения аустенит - мартенсит снижается. *In situ* в ПЭМ изучено формирование фазового равновесия в клиновидных нанообразцах сплава  $Ti_2NiCu$ . Определены зависимости положения границы аустенит-мартенсит от толщины и температуры в области 20 - 100 нм при изменении температуры от 400 до 100 К. Зависимость имеет гистерезисный характер, при  $T = 150$  К,  $h = 20$  нм наблюдается



блокирование мартенситного перехода. Экспериментальные данные находятся в согласии с расчетами согласно теоретической модели.

4. Изучена экспериментально кинетика протекания термоупругого мартенситного перехода и ЭПФ в слоистых композитах актюаторов на основе сплава  $Ti_2NiCu$ , активируемых импульсами электрического тока. Продемонстрирована непрерывная работа наноактюатора с частотой срабатывания 8 кГц. Сделана оценка скорости движения границы перехода мартенсит - аустенит. Исследована зависимость частоты активации от размера микроактюатора. Зафиксирована его непрерывная работа в течение, по крайней мере,  $10^7$  циклов.

**Все основные результаты диссертации, являются оригинальными и получены автором впервые.** Этим определяется научная новизна работы. Автор в диссертационной работе использует современные апробированные методы исследования с использованием высокочувствительной регистрирующей аппаратуры, анализом погрешностей измерения, многократной воспроизводимостью экспериментальных результатов и результатов компьютерного моделирования и их согласием с литературными данными. Поэтому не возникает сомнений в достоверности полученных результатов.

**Практическая значимость полученных результатов.** Результаты работы могут быть использованы для производства устройств микросистемной техники, позволяющих манипулировать индивидуальными нанообъектами. Системы манипулирования и наносборки с применением механических наноинструментов с ЭПФ могут найти применение для прототипирования и мелкосерийного производства различных изделий наноэлектроники, например, биомедицинских датчиков.

**Публикации и апробирование результатов** диссертационной работы. Основные результаты работы опубликованы в 4 научных работах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и 19 публикациях в зарубежных изданиях, входящие в системы цитирования Scopus и Web of Science, получено 2 патента РФ на изобретение, а также доложены на российских и международных конференциях.



**По работе имеются следующие замечания:**

1. В Главе 1 в целом дается достаточный для целей работы литературный обзор. Однако, в структуре обзора превалирует описание имеющихся прототипов устройств для манипулирования микро- и нанообъектами. На мой взгляд, стоило бы больше внимания уделить физическим аспектам проявления мартенситных превращений и ЭПФ.

2. В Разделе 3.6 согласно теоретическим расчетам, мартенситное превращение подавляется при толщине пластины 2 нм, в то время как в эксперименте говорится о 20 нм. Автором не объясняется причина такого расхождения.

3. В разделе 3.7 описывается исследование ЭПФ в тонких клиновидных пластинах сплава  $Ti_2NiCu$  в просвечивающем электронном микроскопе. Однако, до конца не ясна новизна такого эксперимента, ведь здесь происходит обычный ЭПФ при нагреве, а не при охлаждении, как отмечено в работе ранее.

4. В Главе 4 следовало бы доработать схему электрических измерений, чтобы отсутствовали различные паразитные наводки, о которых пишет автор.

5. Имеются небольшие замечания по оформлению диссертационной работы. Есть ряд опечаток, несогласованностей окончаний слов, на части рисунков некоторые надписи приведены на английском языке. Рис. 19 отражает зависимость температур мартенситного превращения от размера зерна (подрисуночная подпись содержит обратное утверждение).

Сделанные замечания имеют частный характер и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы Леги П.В., которая содержит оригинальные и достоверные научные результаты. Автором продемонстрировано хорошее владение современными методиками, методами экспериментальной физики, методами новейших компьютерных расчетов, глубокое понимание физических основ структурных фазовых переходов.

**Заключение.** Основываясь на проведенном анализе представленных материалов, считаю, что диссертационная работа Леги П. В. является законченным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне и вносящим

существенный вклад в понимание структурных фазовых переходов семейств Ti-Ni. По объему выполненных исследований, их актуальности, научному уровню, диссертационная работа отвечает всем требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (в редакции с изменениями, утвержденными Постановлением Правительства РФ от 01.10.2018 № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а диссертант, Петр Викторович Лега, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой общей физики

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Уральский Государственный Лесотехнический  
Университет»

Адрес: 620100, Россия, г.Екатеринбург, ул.Сибирский тракт 37

E-mail: [kashchenkomp@m.usfeu.ru](mailto:kashchenkomp@m.usfeu.ru)

Доктор физико-математических наук,

профессор

*М.П. Кашенко*

М.П. Кашенко

Подпись *Кашенко М.П.* заверяю

Ведущий  
документовед

28 сентября 2022 г.

