

«Утверждаю»

Директор Института физики твердого тела
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук



чл.-корр. РАН А.А. Левченко

29. 08. 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Петра Викторовича Леги «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. (01.04.07) – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации. Успехи в области создания новых материалов в последние годы стимулируют быстрый прогресс в самых разнообразных отраслях микроэлектроники и микросистемной техники. Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) представляют важный класс функциональных материалов, которые обеспечивают гигантские – до 10% деформации, управляемые нагревом. Технология сплавов с ЭПФ в последние годы быстро развивается. Сплавы с ЭПФ обладают набором превосходных свойств, среди которых высокая прочность материала, способность возвращать большие деформации (до 10%) и развивать значительные усилия при нагреве или при воздействии магнитного поля, сверхупругость, высокая демпфирующая способность, хорошая коррозионная стойкость и биосовместимость. В настоящее время известно большое количество интерметаллических сплавов с ЭПФ, например такие как $NiTi$, Ti_2NiCu , $CuAlNi$, $CuZnAl$, Ni_2MnGa и др. Они нашли широкое применение в различных областях техники, в частности в медицине, приборостроении, космической технике и т. д. В том случае, когда ЭПФ реализуется при тепловом воздействии на материал, для работы устройств с ЭПФ в циклическом режиме необходимо организовать периодический подвод и отвод тепла. Управление устройством за счет нагрева и охлаждения может показаться нетехнологичным решением, так как тепловые процессы, особенно при охлаждении, довольно инертны. Однако при уменьшении размеров устройства характерные времена

тепловых процессов снижаются квадратично. Это открывает перспективу создания быстродействующих миниатюрных устройств на основе сплавов с ЭПФ.

Также, крайне актуальной задачей является выяснение физических пределов проявления термоупругого мартенситного перехода и сопровождающего его ЭПФ в зависимости от размера образца. Это необходимо для создания миниатюрных устройств для трехмерного манипулирования микро- и нанообъектами на основе сплавов с ЭПФ. Задачи, связанные с трехмерным манипулированием нанообъектами – крайне актуальная область физики и нанотехнологий. Поэтому, необходимо понять, возможно, ли создание механических инструментов для манипулирования нанообъектами, сравнимыми с этими объектами по размерам. Исследованию и поиску путей решения указанных проблем посвящена диссертационная работа П.В. Леги, что позволяет считать ее весьма актуальной, как с научной, так и прикладной точек зрения.

Общая характеристика диссертационной работы. В диссертации П.В. Леги разработана методика изучения термоупругого мартенситного фазового перехода и ЭПФ на микро- и наномасштабе на основе использования схемы слоистого предварительно напряженного композита, не требующего тренировки для достижения обратимых деформаций. Также, в диссертации развиты экспериментальные методы создания образцов композитных микро- и наноструктур Ti_2NiCu/Pt с ЭПФ методом фокусированного ионного пучка (ФИП), а также методы изучения их обратимой деформации при активации нагревом как в ФИП, так и в установке просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Методом ПЭМ экспериментально исследован термоупругий мартенситный переход в клиновидных пластинах сплава Ti_2NiCu в зависимости от температуры и толщины пластины на нанометровом масштабе. Полученная зависимость объяснена современными методами компьютерного моделирования в совокупности с термодинамическим подходом. Изучена кинетика проявления термоупругого мартенситного перехода и ЭПФ на микроуровне размеров образца слоистого композита и сделана оценка скорости движения границы фазового мартенситного перехода.

В целом, в работе представлен обширный и в ряде случаев уникальный экспериментальный и теоретический материал по исследованию фазовых структурных переходов в сплавах семейства $Ti-Ni$ на микро- и наноуровне, а также выполнен квалифицированный анализ полученных результатов.

Научная новизна. Диссертационная работа П.В. Леги является комплексным исследованием, в котором получено значительное количество результатов по изучению фазовых структурных превращений в сплаве Ti_2NiCu на микро- и наномасштабе. К числу наиболее значимых и новых из них можно отнести следующее.

1. Предложен новый метод изучения ЭПФ на микро- и наноуровне с применением функциональных материалов на основе сплавов с ЭПФ, представляющих собой слоистую структуру, состоящую из упругого слоя и слоя с ЭПФ, причем последний предварительно псевдопластически деформирован на растяжение. Такой композитный материал отличается большой обратимой изгибной деформацией на микро- и наноуровне, а также технологичностью.

2. Экспериментально исследован образец композитной микроструктуры с ЭПФ с размерами: длина 12 мкм, ширина 3 мкм, толщина слоя с ЭПФ 0.5 мкм. Показано, что температура мартенситного перехода у субмикронного образца сплава осталась такой же, как и у исходного. В слое сплава Ti_2NiCu толщиной 0.5 мкм ЭПФ проявляется качественно так же, как и в исходной быстрозакаленной ленте сплава толщиной 40 мкм. Продемонстрирована обратимая деформация микропинцета, управляемая лазерным лучом, при этом наблюдается прогиб до 1 мкм. Имеется хорошее согласие теоретической оценки псевдопластической деформации на основе модели, описывающей деформацию крупноразмерного композита, и экспериментальных измерений. Таким образом, ЭПФ в 500 нм слоях проявляется качественно так же, как и в микронных слоях.

3. Впервые изучен ЭПФ в слоистых композитных наноструктурах, состоящих из сплава Ti_2NiCu и платины. Установлено, что ЭПФ при комнатной температуре сохраняется вплоть до толщин функционального слоя 70 нм, а при дальнейшем уменьшении толщины управляемая деформация, связанная с ЭПФ, резко снижается. Изучены технологические ограничения при создании микромеханических девайсов на основе двуслойного композита с ЭПФ при помощи метода ФИП и сделана оценка для минимальной толщины слоя, который аморфизуется ионным пучком в процессе изготовления композита. Впервые прямым методом в ПЭМ исследованы одновременно и термоиндуцированные деформации и структурное фазовое (мартенситное) превращение в нанобразцах сплава.

4. Экспериментально определены зависимости положения границы аустенит-мартенсит от толщины пластины Ti_2NiCu и температуры клиновидной пластины в области 20 – 100 нм при изменении температуры от 400 до 100 К. Экспериментальные результаты

согласуются с численным расчетом на основе феноменологической дислокационно-кинетической теории, а также с результатами компьютерного моделирования первопринципными методами и методом молекулярной динамики.

5. Впервые изучено экспериментально быстроедействие композитного микроактюатора с ЭПФ при активации импульсами электрического тока, пропускаемого непосредственно через микроактюатор. Продемонстрировано быстроедействие до 8 кГц. Сделана оценка скорости движения границы перехода мартенсит – аустенит в сплаве с ЭПФ при активации микроактюатора.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием всесторонне аттестованных образцов, современного экспериментального оборудования, современных суперкомпьютеров и кластеров, а также, апробированных методик. Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования, приведенных в диссертации, согласуются между собой и с существующими литературными данными.

Научная и практическая значимость работы. Диссертация П.В. Леги содержит результаты, имеющие несомненную научную значимость и представляющие определенный практический интерес. В частности, в детальном изучении ЭПФ в слоистых композитных наноструктурах, а также в оценках скорости движения границы перехода аустенит-мартенсит в сплаве с ЭПФ при активации актюатора джоулевым теплом. Эти результаты могут быть востребованы научными коллективами, изучающими сплавы с ЭПФ, а также ведущими разработки в области создания миниатюрных нано-инструментов.

Публикации и апробирование результатов. По теме диссертации автором опубликовано 55 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, 19 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, 2 патента РФ на изобретение. Кроме того, выпущено 34 публикаций в сборниках трудов конференций.

Замечания по диссертационной работе. Диссертационная работа П.В. Леги выполнена на достаточно высоком научном и методологическом уровне, отличается качественным изложением материала, подробным и квалифицированным анализом результатов. Вместе с тем, она не свободна от недостатков, к которым можно отнести следующее.

1. Цель работы, сформулированная как «исследование особенностей проявления термоупругого мартенситного перехода и ЭПФ в сплаве Ti_2NiCu на микро- и наномасштабе», представляется недостаточно конкретной.
2. В Разделе 3.2 Диссертации, автором диссертационной работы, ничего не говорится о возможном нагреве образца в процессе просмотра на установке ПЭМ. Также, было бы корректным более развернуто описать технические детали эксперимента, например, плотность тока на образце.
3. В Разделе 3.2 не говорится о том, что ионный пучок, используемый для приготовления клиновидной пластины, может портить образец и вызывать соответствующие дефекты. Хорошо известно, что дефекты оказывают большое влияние на параметры мартенситного превращения. Автором не уделяется достаточно доказательств, того, что именно размерный эффект, а не индуцированные дефекты вызывают наблюдаемые результаты (возможно, термической обработкой).
4. В диссертации имеются недостатки оформительского характера: много надписей рисунков приведены на английском языке, например, рис. 62 – 66. Присутствует определенное количество орфографических и пунктуационных ошибок, например, в Разделе 1.4 в предложении «Мартенситные превращения также методами МД, [9], где изучали зависимость размера зерна от температуры мартенситных превращений, и теории функционала плотности [10]» пропущено слово.

Перечисленные недостатки не являются принципиальными и не влияют на основные выводы и защищаемые положения диссертационной работы. В целом, она выполнена на высоком научном и современном методологическом уровне, хорошо структурирована, отличается хорошим языком и ясностью изложения мысли. Содержание диссертации полностью **соответствует паспорту специальности 1.3.8. (01.04.07) – Физика конденсированного состояния**. Автореферат полно и точно отражает содержание диссертации.

Подводя итог, можно заключить, что диссертация П.В. Леги является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой имеют существенное значение для развития научного знания в области физики фазовых переходов. По объему выполненных исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает всем требованиям (п. II. 9-14 положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842

от 24 сентября 2013 г.) к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. (01.04.07) – Физика конденсированного состояния.

Доклад по диссертации П.В. Леги был заслушан на заседании семинара «Физическое материаловедение» 1 июня 2022 г.

Отзыв обсужден на заседании Ученого совета ИФТТ РАН 11 июля 2022 г.

Составитель отзыва:

Заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, профессор
Борис Борисович Страумал



Подпись Б.Б. Страумала заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, к.ф.-м.н.



Терещенко А.Н.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН). Адрес: 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна д. 2. Тел.: 8(496)52 219-82. E-mail: adm@issp.ac.ru