

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.01,
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук, по диссертации на соискание ученой степени
кандидата наук.

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 11 ноября 2022 г., № 9

**О присуждении Леги Петру Викторовичу, гражданину России, ученой
степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация на тему: «Термоупругий мартенситный переход и эффект
памяти формы в сплаве Ti_2NiCu на микро- и наномасштабе» принята к
защите 22 апреля 2022, протокол № 2, диссертационным советом 24.1.111.01,
созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Российской академии наук (125009, Москва, ул. Моховая, д.11. корп.7)
(приказ Рособнадзора о создании совета № 2397-1776 от 07.12.2007 г.; приказ
Минобрнауки РФ о продлении деятельности совета № 75/нк от 15.02.2013 г.)

Соискатель Лега Петр Викторович, 1986 года рождения, в 2009 году
окончил ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет
имени Н.Э.Баумана (Национальный Исследовательский Университет)».

С 25.03.2016 по 25.06.2016 и с 27.04.2017 по 27.10.2017 был прикреплен к
аспирантуре ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в качестве экстерна для сдачи
кандидатских экзаменов по иностранному языку (английский), истории и
философии науки (физико-математические науки) и по специальности 01.04.07 -
Физика конденсированного состояния.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана 08 июня 2021 г. ФГБУН
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской
академии наук.

В настоящее время работает в лаб. №192 «Физика магнитных явлений в
микроэлектронике» ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в должности младшего
научного сотрудника.

Работа выполнена в лаборатории «Физика магнитных явлений в
микроэлектронике» №192) Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Научный руководитель: Коледов Виктор Викторович, доктор физико-
математических наук (спец. 01.04.11 «Физика магнитных явлений»), ведущий
научный сотрудник лаб. №192 «Физика магнитных явлений в
микроэлектронике» ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Официальные оппоненты:

• **Кашенко Михаил Петрович**, доктор физико-математических наук (1.3.8
(01.04.07) - Физика конденсированного состояния), профессор, заведующий
кафедрой общей физики Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Уральский
Государственный Лесотехнический Университет».

• **Квашнин Александр Геннадьевич**, доктор физико-математических наук (1.3.8 (01.04.07) «Физика конденсированного состояния»), старший преподаватель проектного центра по энергетическому переходу Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковского института науки и технологий».

Дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (г. Черноголовка) (ИФТТ РАН), в своем положительном отзыве, подписанным Страумалом Борисом Борисовичем, доктором физико-математических наук, заведующим лабораторией поверхностей раздела в металлах ИФТТ РАН, и утвержденным Директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН, Левченко Александром Алексеевичем, отметила, что диссертация Леги П.В. является завершённой квалификационной научной работой, полностью удовлетворяющей требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Лега Петр Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Работа выполнена на актуальную тему, которая посвящена созданию и исследованию новых функциональных материалов на основе сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ). Также, 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 нанообъектов – крайне актуальная область физики и нанотехнологий. Полученные результаты достоверны, обладают научной значимостью и новизной.

В отзыве указаны следующие замечания:

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.

Результаты диссертационной работы изложены в 55 работах, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 19 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, 2 патента РФ на изобретение, 34 - в сборниках трудов конференций. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Лега П.В. (2021). Термоупругий мартенситный переход и эффект памяти формы в сплаве Ti₂NiCu на микро- и наномасштабе. *Нелинейный мир*. Т. 19. № 2. С. 18-22.
2. Лега П.В., Коледов В.В., Кучин Д.С., Орлов А.П. (2018). Высокоскоростной композитный микроактуатор на основе сплава с эффектом памяти формы. *Нелинейный мир*, 16 (2). С. 21-23. ISSN 2070-0970
3. Лега П.В. (2011). Система управления наномеханическими устройствами в вакуумной камере ионного сканирующего микроскопа при помощи лазерного нагрева. *Нелинейный мир*, 9(1), С. 38-39.
4. Иржак А.И., Истомин В.В., Коледов В.В., Кучин Д.С., Лега П.В., Калашников В.С., Цирлина Г.А., Шавров В.Г., Шеляков А.В. (2009). Упорядочение, мартенситное превращение и эффект памяти формы в субмикронных образцах быстрозакаленного сплава Ni₅₀Ti₂₅Cu₂₅ // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. Т. 73. № 8. С. 1141-1143.
5. Лега П.В., Карцев А.И., Shuhui Lv, Subramani R., Коледов В.В. (2022). Термоупругое мартенситное превращение и эффект памяти формы в нанопластинах на основе сплавов Ti-Ni: эксперимент, моделирование методом теории функционала плотности и молекулярной динамики. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. Т. 2. № 2. С. 45- 50.
6. Orlov A.P., Frolov A.V., Lega P.V., Kartsev A., Zybtssev S.G., Pokrovskii V.Ya. and Koledov V.V. (2021). Shape memory effect nanotools for nano-creation: examples of nanowire-based devices with charge density waves. *Nanotechnology*. V. 32. 49LT01 (6 pp).
7. Lega P., Kartsev A., Nedospasov I., Lv S., Lv X., Tabachkova N., Irzhak A., Orlov A. and Koledov V. (2020). Blocking of the martensitic transition at the nanoscale in a Ti₂NiCu wedge. *Physical Review B*, 101, 214111.
8. Lega P.V., Orlov A.P., Frolov A.V., Koledov V.V., Smolovich A.M., Subramani R., Irzhak A.V., Shelyakov A.V. (2020). 3D Nanomanipulation: Design and applications of functional nanostructured biomaterials. *Journal of Physics: Conference Series*. V. 1461, 012082.
9. Orlov A.P., Frolov A.V., Smolovich A.M., Lega P.V., Shavrov V.G., Zybtssev S.G., Pokrovskiy V.Ya., Kolodev V., Von Gratoswki S., Fam V.C., Irzhak A.V., Bhattacharria S., Pakizeh T. (2020) Nano engineering of quantum multifunctional structures with interferometers by mechanical "bottom-up" assembling. *Journal of Physics: Conference Series*. V. 1461, 012066.
10. Kuchin D.S., Lega P.V., Orlov A.P., Frolov A.V., Irzhak A.V., Zhikharev A.M., Kamantsev A.P., Koledov V.V., Shelyakov A.V., Shavrov V.G. (2018). High-Speed Composite Microactuator Based on Ti₂NiCu Alloy with Shape Memory Effect. *Physics of the Solid State* Tom 60(6), P. 1163 - 1167.
11. Antonov R.A., Kamantsev A.P., Koledov V.V., Koledov L.V., Kuchin D.S., Lega P.V., Morozov E.V., Orlov A.P., Sivachenko A.P., Shavrov V.G., Shelyakov A.V. (2018). Delay Effect for Pulsed Excitation of Actuator Based on Rapidly Quenched Ti₂NiCu Alloy with Thermoelastic Martensitic Transformation. *Physics of the Solid State*, Vol. 60 (6), pp. 1190–1194.
12. Frolov A.V., Koledov V.V., Lega P.V., Orlov A.P., Smolovich A.M., Barinov N.A., Klinov D.V. (2018). Deposition and visualization of DNA molecules on graphene that is obtained with the aid of mechanical

- splitting on a substrate with an epoxy sublayer *Journal of Communications Technology and Electronics*. V. 63(10). P. 1226 – 1229.
13. Lega P.V., Koledov V.V., Kuchin D.S., Orlov A.P., Shavrov V.G., Tabachkova N.Y., Irzhak A.V., Shelayakov A.V. (2018). Fundamental limitations on miniaturization of shape-memory micromechanical devices. Thermoelastic martensite transformation on micro-, nano-, and mesoscales. *Journal of Communications Technology and Electronics*. V. 63(5). P. 468-475.
14. Irzhak A.V., Tabachkova N.Y., Red'kin A.N., Evstaf'eva M.V., Koledov V.V., Lega P.V., Kuchin D.S., Orlov A.P., Mazaev P.V., von Gratowski S.V., Shavrov V.G., Shelyakov A.V. (2018). Structure and morphology of zinc oxide nanorods. *Journal of Communications Technology and Electronics*. V. 63(1). P. 75-79.
15. Lega P., Koledov V., Orlov A., Kuchin D., Frolov A., Shavrov V., Martynova A., Irzhak A., Shelyakov A., Sampath V., Khovaylo V., Ari-Gur P. (2017) *Composite Materials Based on Shape-Memory Ti2NiCu Alloy for Frontier Microand Nanomechanical Applications*. *Advanced Engineering Materials*. – 2017. V 19 (8), 1700154.
16. Irzhak A.V., Lega P.V., Zhikharev A.M., Koledov V.V., Orlov A.P., Kuchin D.S., Tabachkova N.Yu., Dikan V.A., Shelyakov A.V., Beresin M.Yu., Pushin V.G., von Gratowski S.V., Pokrovskiy V.Ya., Zytsev S., and Shavrov V. G. (2017). Shape memory effect in nanosized Ti2NiCu alloy-based composites, *Doklady Physics*, Vol. 62 (1), pp. 5-9.
17. Zhikharev A.M., Beresin M.Y., Lega P.V., Koledov V.V., Kasyanov N.N., Martynov G.S., Irzhak A.V. (2016). New system for manipulation of nanoobjects based on composite Ti2NiCu/Pt nanotweezers with shape memory effect. *Journal of Physics: Conference Series*. V. 741. P. 012206.
18. Mazaev P.V., Koledov V.V., Shavrov V.G., Lega P.V., Mashirov A.V., Kamantsev A.P., Kuchin D.S., Kolesov D.V., Yaminskii I.V., Zakharov D.I., Dikan, V.A., Irzhak A.V. (2016). Thermoelastic properties of micron-size actuators based on the Ti2NiCu/Pt composite with shape-memory effect. *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 61, Issue 6, pp. 630-638.
19. Lega P.V., Kuchin D.S. Koledov V.V., Sampath V., Zhikharev A.M., Shavrov V.G. (2016) Simulation of control system for shape memory nanotweezers. *Materials Science Forum*. V. 845. P. 142 – 145.
20. Lega P.V., Koledov V.V., Kuchin D.S., Mazaev P.V., Zhikharev A.M., Mashirov A.V., Kalashnikov V.S., Zytsev S.A., Pokrovskii V.Y., Shavrov V.G., Dikan V.A., Koledov L.V., Shelyakov A.V., Irzhak A.V. (2015). Simulation of the control process applied to the micromechanical device with the shape memory effect *Journal of Communications Technology and Electronics*. V. 60(10) P. 1124.
21. Irzhak A.V., Kalashnikov V.S., Koledov V.V., Kuchin D.S., Lebedev G.A., Lega P.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Shavrov V.G., Shelyakov A.V. (2010). Giant reversible deformations in a shape-memory composite material. *Technical Physics Letters*. V. 36 (7). P. 75 – 81.
22. Zakharov D., Lebedev G., Irzhak A., Koledov V., Lega P., Kuchin D., Afonina V., Perov E., Shavrov V., Shelyakov A., Pushin V. (2010). An enhanced composite scheme of shape memory actuator for smart systems. *Physics Procedia*. P. 58 – 64.
23. Irzhak A.V., Zakharov D.I., Kalashnikov V.S., Koledov V.V., Kuchin D.S., Lebedev G.A., Lega P.V., Perov E.P., Pikhtin N.A., Pushin V.G., Tarasov I.S., Khovailo V.V., Shavrov V.G., Shelyakov A.V. (2010) Actuators based on composite material with shape-memory effect. // *Journal of Communications Technology and Electronics* V. 55 (7). P. 874-886.
24. Патент на изобретение РФ 2458002. 2012. Российская Федерация. Микромеханическое устройство, способ его изготовления и система манипулирования микро- и нанообъектами. / Афонина В.С., Захаров Д.И., Иржак А.В., Коледов В.В., Лега П.В., Маширов А.В., Пихтин Н.А., Ситников Н.Н., Тарасов И.С., Шавров В.Г., Шеляков А.В. Заявка № 2010132879/28 от 05.08.2010.
25. Патент на изобретение РФ 2698570. 2019. Российская Федерация. Устройство для манипулирования микро- и нанообъектами, способ его изготовления и система управления. / Лега П.В., Орлов А.П., Фролов А.В., Жихарев А.М., Кучин Д.С., Иржак А.В., Коледов В.В., Шеляков А.В. Заявка № 2018123272/28 от 26.06.2018.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На автореферат поступили положительные отзывы из:

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» от к.т.н., доцента кафедры, зам. директора по аспирантуре Агасиева С.В (замечания: не очень

понятна новизна теоретической оценки деформаций слоистого композита с ЭПФ; при описании экспериментов по кинетике мартенситных превращений, автором не приводятся параметры тока электронного пучка);

ФГБУН Физического института им. Лебедева РАН, от д.ф.-м.н., профессора Витухновского А.Г. (замечаний нет)

МГУ им. М.В. Ломоносова, от к.ф.-м.н. старшего научного сотрудника Карпенкова Д.Ю. (замечание: второе и третье положения, выносимые на защиту, представляют собой результат работы, что не соответствует требованиям к формулировке и содержанию положений. Автору следовало бы объединить их с четвертым положением и дополнить физическим объяснением выявленных экспериментальных и расчетных закономерностей).

НИТУ МИСиС, от к.т.н., доцента кафедры физического материаловедения Щетинина И.В. (замечаний нет).

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», от к.ф.-м.н., и.о. зав. кафедрой физики Коноплина Н.А (замечаний нет)

Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации:

Кашенко Михаил Петрович, доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния), заведующий кафедрой общей физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский Государственный Лесотехнический Университет», является специалистом в области физики конденсированных состояний и наук о материалах, главным образом, в теории мартенситных превращений.

Квашнин Александр Геннадьевич, доктор физико-математических наук, специальность 1.3.8 (01.04.07) – «Физика конденсированного состояния», старший преподаватель, Проектный центр по энергетическому переходу Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковского института науки и технологий», является специалистом в области физики конденсированного состояния, главным образом, в компьютерном дизайне новых функциональных и конструкционных материалов.

Официальные оппоненты широко известны в данных отраслях науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонируемой диссертации.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (г. Черноголовка) широко известна своими исследованиями в области физики конденсированного состояния и физического материаловедения. В ИФТТ проводятся фундаментальные экспериментальные и теоретические исследования новых материалов. Многочисленные работы её сотрудников в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для

защиты.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

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.

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.

Теоретическая значимость работы: Сочетая метод классической молекулярной динамики с численными квантово-механическими расчетами, получено количественное и качественное описание мартенситного фазового перехода в тонких пластинах нанометрового масштаба на основе никелида титана.

Практическая значимость работы: результаты работы могут найти применение 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 для диагностики инфекционных заболеваний, в технологии МЭМС и НЭМС для создания исполнительных элементов и роботизированных устройств, в lab-on-chip технологии, микробиологии, для исследования биологических (ДНК, сенсиллы насекомых и др.) и небиологических (углеродные нанотрубки, графеновые слои, вискеры) микро- и нанообъектов.

Достоверность результатов работы обеспечена использованием современных экспериментальных методов решения поставленных задач, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласием экспериментальных и расчетных данных. Помимо этого, все основные

результаты были опубликованы в ведущих международных и российских журналах, а также доложены на международных и отечественных конференциях, что свидетельствует об их достаточной апробации.

Личный вклад соискателя: результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо совместно с сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и НИТУ МИСиС, причём при выполнении работ автором сделан определяющий вклад в постановку задач исследования, создание новых экспериментальных установок, проведение экспериментов, обработку результатов, выполнение теоретических выкладок и численных расчетов.

Автор ставил эксперименты совместно с к.ф.-м.н. Орловым А.П. на установке ФИП. В 2019 самостоятельно освоил пробоподготовку на ФИП и получил сертификат, подтверждающий квалификацию оператора ФИП. В дальнейшем, делал образцы и эксперимент самостоятельно в присутствии оператора. Автор ставил эксперименты совместно с к.ф.-м.н. Табачковой Н.Ю. на установке ПЭМ. Автор освоил работу с программами численного расчета как LAMMPS, VASP, Quantum Espresso. Автор делал численные расчеты совместно с к.ф.-м.н. Карцевым А.И., а расчеты поверхностной энергии методами DFT и зависимости температуры от полной энергии на атом методом молекулярной динамики вдоль кристаллографических направлений (001), (110), (122), осуществлял самостоятельно.

Диссертационная работа П.В. Леги является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит решение научных и практических задач по изучению термоупругого мартенситного перехода и эффекта памяти формы в сплаве Ti_2NiCu на микро- и наномасштабе. Работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 с изменениями, утвержденными постановлением Правительства РФ от 11.09.2021 №1539, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

На заседании 11 ноября 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Леги П.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 18 человек, из которых 4 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – 1, недействительных бюллетеней – 1.

Заместитель председателя диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, академик РАН

С.А.Никитов

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор
физико-математических наук

И.Е.Кузнецова



«11» ноября 2022 г.