

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.07, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 17 декабря 2015 года публичной защиты диссертации Куксгаузен Ирины Владимировны «Термоупругие мартенситные превращения и функциональные свойства в монокристаллах ферромагнитного сплава Co–Ni–Ga с наноразмерными частицами γ' -фазы» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Время начала заседания: 14-45.

Время окончания заседания: 16-25.

На заседании диссертационного совета присутствовали 20 из 24 членов диссертационного совета, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния:

1. Багров В.Г., председатель диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
2. Ивонин И.В., заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
3. Киреева И.В., ученый секретарь диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
4. Бордовицын В.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
5. Брудный В.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
6. Войцеховский А.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
7. Гермогенов В.П.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
8. Давыдов В.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
9. Дударев Е.Ф.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
10. Караваев Г.Ф.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
11. Коротаев А.Д.,	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
12. Ляхович С.Л.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
13. Мельникова Н.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
14. Потекаев А.И.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
15. Старенченко В.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
16. Тюменцев А.Н.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
17. Тютюрев В.Г.	д-р физ.-мат. наук	01.04.10
18. Чумляков Ю.И.	д-р физ.-мат. наук	01.04.07
19. Шаповалов А.В.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02
20. Шарапов А.А.	д-р физ.-мат. наук	01.04.02

Заседание провёл председатель диссертационного совета, доктор физико-математических наук Багров Владислав Гаврилович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить И.В. Куксгаузен учёную степень кандидата физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.07
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17.12.2015 г., № 44

О присуждении **Куксгаузен Ирине Владимировне**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Термоупругие мартенситные превращения и функциональные свойства в монокристаллах ферромагнитного сплава Co–Ni–Ga с наноразмерными частицами γ' -фазы»** по специальности **01.04.07 – Физика конденсированного состояния**, принята к защите 08.10.2015 г., протокол № 36, диссертационным советом **Д 212.267.07** на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 798-745/68 от 13.04.2007 г.).

Соискатель **Куксгаузен Ирина Владимировна**, 1989 года рождения.

В 2012 г. соискатель окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

В 2015 г. соискатель очно окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории физики высокопрочных кристаллов Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный

исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре физики металлов физического факультета и в лаборатории физики высокопрочных кристаллов Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Киреева Ирина Васильевна**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория физики высокопрочных кристаллов Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова, главный научный сотрудник; по совместительству – кафедра физики металлов, профессор.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, **Чумляков Юрий Иванович**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория физики высокопрочных кристаллов Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова, заведующий лабораторией; по совместительству – кафедра физики металлов, профессор.

Официальные оппоненты:

Соловьева Юлия Владимировна, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра физики, профессор

Беляев Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра теории упругости, ведущий научный сотрудник

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Томск, в своем положительном заключении, подписанном **Лотковым Александром Ивановичем** (доктор физико-математических наук, профессор, лаборатория материаловедения сплавов с памятью формы, заведующий лабораторией), указала, что диссертационная работа И.В. Куксгаузен, направленная на исследование влияния ориентации кристалла, температуры испытания, формы, размера и объемной доли частиц γ' -фазы на функциональные свойства – эффект памяти формы и сверхэластичность в ферромагнитных монокристаллах сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ (ат, %), является актуальной. К наиболее значимым результатам относятся: теоретическое обоснование экспериментально обнаруженной ориентационной и температурной зависимости критических напряжений образования мартенсита под нагрузкой, величины эффекта памяти формы и сверхэластичности в однофазных монокристаллах сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$, основанное на анализе уравнения Клапейрона-Клаузиуса; установленное влияние наноразмерных частиц γ' -фазы на механизмы взаимодействия частиц с $L1_0$ -мартенситом, морфологию $L1_0$ -мартенсита, соотношение между упругой и диссипативной энергией; наблюдение высокотемпературной сверхэластичности и проявление сверхэластичности в широком температурном интервале во всех исследованных кристаллах с наноразмерными частицами γ' -фазы; наблюдение двойного эффекта памяти формы в $[\bar{1}23]$ -, $[011]$ - и $[001]$ - ориентациях после старения при $T = 623\text{K}$, 15 мин под сжимающей нагрузкой и тренировки образцов в температурном интервале проявления сверхэластичности. Полученные результаты послужат развитию теории термоупругих мартенситных превращений, и могут быть использованы при выборе структурных состояний при разработке сплавов с заданными свойствами: однократным и двойным эффектом памяти формы и высокотемпературной сверхэластичностью.

Соискатель имеет 38 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 23 работы, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 9 (из них 4 статьи в зарубежных журналах, включенных в Web of Science, и 4 статьи в российских журналах, переводные версии которых включены в Web of Science),

глава в монографии – 1, публикаций в сборниках трудов и материалов международных и всероссийских научных конференций – 13 (из них 4 публикации в сборниках материалов зарубежных конференций). Общий объем публикаций – 11,62 п.л., авторский вклад – 2,99 п.л.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1. Чумляков Ю. И. Термоупругие мартенситные превращения в монокристаллах, содержащих дисперсные частицы / Ю. И. Чумляков, И. В. Киреева, Е. Ю. Панченко, В. А. Кириллов, Е. Е. Тимофеева, **И. В. Кретинина (Куксгаузен)**, Ю. Н. Данильсон, I. Karaman, H. Maier, E. Cesari // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54, № 8. – С. 96–108. – 0,81 / 0,10 п.л.

в переводной версии журнала:

Chumlyakov Yu. I. Thermoelastic martensitic transformation in single crystals with disperse particles / Yu. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, E. Y. Panchenko, V. A. Kirillov, E. E. Timofeeva, **I. V. Kretinina (Kuksgauzen)**, Y. N. Danil'son, I. Karaman, H. Maier, E. Cesary // Russian Physics Journal. – 2012. – Vol. 54, Is. 8. – P. 937–950. – 0,81 / 0,10 п.л. – DOI: 10.1007/s11182-011-9701-5

2. Чумляков Ю. И. Особенности развития термоупругих мартенситных превращений под нагрузкой в монокристаллах CoNiGa, с различным числом частиц γ' -фазы / Ю. И. Чумляков, И. В. Киреева, **И. В. Кретинина (Куксгаузен)**, В. А. Кириллов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 11. – С. 46–50. – 0,32 / 0,08 п.л.

в переводной версии журнала:

Chumlyakov Yu. I. Peculiarities of thermoelastic martensite transformation under loading in CoNiGa single crystals with different number of variants of the γ' -phase particles / Yu. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, **I. V. Kretinina (Kuksgauzen)**, V. A. Kirillov // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 55, Is. 11. – P. 1290–1295. – 0,32 / 0,08 п.л. – DOI: 10.1007/s11182-013-9958-y

3. Kireeva I. V. Influence of γ' nanometric particles on martensitic transformation and twinning structure of $L1_0$ martensite in Co-Ni-Ga ferromagnetic shape memory

single crystal / I. V. Kireeva, J. Pons, C. Picornell, Yu. I. Chumlyakov, E. Cesari, **I. V. Kretinina (Kuksgauzen)** // *Intermetallics*. – 2013. – Vol. 35. – P. 60–66. – 0,92 / 0,15 п.л. – DOI: 10.1016/j.intermet.2012.10.018

4. Kireeva I. V. Effect of oriented γ' precipitates on shape memory effect and superelasticity in Co-Ni-Ga single crystals / I. V. Kireeva, C. Picornell, J. Pons, **I. V. Kretinina (Kuksgauzen)**, Yu. I. Chumlyakov, E. Cesari // *Acta Materialia*. – 2014. – Vol. 68. – P. 127–139. – 1,41 / 0,23 п.л. – DOI: 10.1016/j.actamat.2014.01.019

5. Chumlyakov Y. I. Shape memory effect and superelasticity in single crystals of high-strength ferromagnetic alloy / Y. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, E. Y. Panchenko, E. E. Timofeeva, **I. V. Kretinina (Kuksgauzen)**, O. A. Kuts, I. Karaman, H. Maier // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1013. – P. 15– 22. – 0,50 / 0,07 п.л. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1013.15

На диссертацию и автореферат поступили 8 положительных отзывов. Отзывы представили: 1. **В.Г. Пушин**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией цветных сплавов Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, и **Н.Н. Куранова**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории цветных сплавов Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, *без замечаний*. 2. **Н.А. Конева**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры физики Томского государственного архитектурно-строительного университета, и **А.А. Клопотов**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Прикладная механика и материаловедение» Томского государственного архитектурно-строительного университета, *без замечаний*. 3. **В.И. Зельдович**, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории физического металловедения Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, *с замечанием*: не изучено действие магнитного поля на магнитоиндуцированную деформацию. 4. **С.Д. Прокошкин**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Москва, и **И.Ю. Хмелевская**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Москва, *с замечанием*: использован непривычный термин «двойной эффект» вместо принятого в литературе

«обратимого» или «двухстороннего». 5. **Ю.А. Перлович**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики прочности Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, и **М.Г. Исаенкова**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физических проблем материаловедения Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, *с замечанием*: нет указаний на то, что диссертант принимает во внимание изменение совершенства монокристаллов, как общее, так и локальное, в частности – на участках выделения частиц. 6. **Н.Н. Реснина**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физической механики Санкт-Петербургского государственного университета, *с замечаниями*: не показано, почему объемная доля частиц γ' -фазы не увеличивается при выдержке при 623К, 1 ч, по сравнению со старением 623К, 15 мин и возрастает примерно в 2 раза, за следующие 2 часа старения; на рис. 8 не приведено пояснение применяемых обозначений закрашенных и пустых значков. 7. **Л.Г. Коршунов**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., главный научный сотрудник лаборатории физического металловедения Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, *с замечаниями*: не приведены рекомендации по оптимизации структуры и режима термической обработки анализируемого функционального материала; неполно отражена методическая часть. 8. **Ю.Ф. Иванов**, д-р физ.-мат. наук, доц., ведущий научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, *с замечаниями*: не ясно, анализировалась ли однородность элементного состава монокристаллов в исходном состоянии и после термомеханических воздействий; следовало уточнить, какую форму имеют частицы γ' -фазы после старения 623 К, 3 ч: пластинки, иглы, эллипсоиды; следовало пояснить, что означает выражение «мартенсит зарождается не в объеме материала, а между частицами» (С. 9).

В отзывах отмечается, что диссертационная работа И.В. Куксгаузен посвящена актуальной проблеме исследования развития термоупругих мартенситных превращений и связанных с ними эффектами памяти формы и сверхэластичности. Автором диссертации за счет большого объема структурных и механических исследований и использования монокристаллов сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ выполнено весьма трудоемкое высококвалифицированное исследование, результаты которого значимы в научном и практическом отношениях.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **Ю.В. Соловьева** является высококвалифицированным специалистом в области физики прочности и пластичности металлов и сплавов, в работе с монокристаллами и фазовыми превращениями, известным специалистом в области экспериментальной и аналитической электронной микроскопии; **С.П. Беляев** является известным специалистом в области фазовых термоупругих переходов в сплавах с эффектом памяти формы; в лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы **Института физики прочности и материаловедения СО РАН** работают квалифицированные специалисты, известные своими достижениями в области физики конденсированного состояния и, в частности, в области исследования термоупругих мартенситных превращений.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана термодинамическая модель, объясняющая зависимость температур мартенситного превращения, напряжений начала мартенситного превращения под нагрузкой от параметров наноразмерных частиц γ' -фазы, ориентации кристаллов и температуры испытания при B2-L1₀ мартенситном превращении в монокристаллах сплава Co₄₉Ni₂₁Ga₃₀;

предложены механизмы взаимодействия L1₀-мартенсита с наноразмерными частицами γ' -фазы, объясняющие зависимость тонкой структуры двойников в L1₀-мартенсите, деформации превращения, температурного и механического гистерезисов от размера и объемной доли частиц γ' -фазы;

доказано, что выделение наноразмерных частиц γ' -фазы в монокристаллах сплава Co₄₉Ni₂₁Ga₃₀ приводит к ослаблению ориентационной зависимости критических напряжений образования мартенсита под нагрузкой, деформации превращения, температурного и механического гистерезисов по сравнению с однофазными кристаллами.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что соотношение упругой и рассеяной энергий, деформация превращения и температурная зависимость напряжений начала B2-L1₀ мартенситного превращения под нагрузкой в монокристаллах сплава Co₄₉Ni₂₁Ga₃₀ определяются размером, объемной долей и числом вариантов наноразмерных частиц γ' -фазы;

применительно к проблематике диссертации эффективно использованы монокристаллы различных ориентаций и современные методы исследования структуры, механических и функциональных свойств – рентгеноструктурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия, метод дифференциальной сканирующей калориметрии, механические испытания при охлаждении/нагреве и под нагрузкой;

изложены результаты исследования влияния формы, размера и числа вариантов наноразмерных частиц γ' -фазы на развитие B2-L1₀ мартенситного превращения под нагрузкой, температурный и механический гистерезисы, деформацию превращения, и проведен анализ их зависимости от ориентации кристалла, деформации раздвойникованием L1₀-мартенсита и температуры испытания.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны физические принципы управления температурами мартенситных превращений, величиной температурного интервала сверхэластичности и величинами обратимой деформации, температурного и механического гистерезисов в монокристаллах ферромагнитного сплава Co₄₉Ni₂₁Ga₃₀ при B2-L1₀ мартенситном превращении за счет выбора ориентации монокристаллов, размера, объемной доли и числа кристаллографических вариантов дисперсных частиц γ' -фазы;

определены перспективы практического использования монокристаллов ферромагнитного сплава Co₄₉Ni₂₁Ga₃₀ с наноразмерными частицами γ' -фазы в качестве материалов, проявляющих обратимые деформации в широком интервале температур, высокотемпературную сверхэластичность и двойной эффект памяти формы;

представлены рекомендации по выбору параметров термообработки – температура, время и условия (в свободном состоянии или под сжимающей нагрузкой) старения – и ориентации оси деформации для создания необходимых условий для проявления двойного эффекта памяти формы в монокристаллах ферромагнитного сплава Co₄₉Ni₂₁Ga₃₀.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные результаты могут быть использованы в научных и образовательных учреждениях, в которых ведутся исследования по термоупругим мартенситным превращениям в металлах и сплавах: Институте металлургии и

материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), Национальном исследовательском Томском государственном университете, Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), Томском государственном архитектурно-строительном университете, Институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), Московском государственном институте стали и сплавов, Санкт-Петербургском государственном университете, Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Челябинском государственном университете.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета и Университета г. Пальма-де-Майорка, Испания; показана воспроизводимость результатов исследования;

идея базируется на фундаментальных представлениях термодинамики, кристаллографии мартенситных превращений, теории пластичности и прочности;

использовано сопоставление и согласие авторских результатов с теоретическими моделями и экспериментальными данными других авторов по данной тематике;

установлено качественное согласие авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках;

использованы современные методики сбора и обработки экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые в однофазных монокристаллах сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ обнаружена ориентационная зависимость величины обратимой деформации, которая оказывается равной теоретическому значению деформации решетки для соответствующих ориентаций. Установлено влияние наноразмерных частиц γ' -фазы на структуру $L1_0$ -мартенсита и механизмы взаимодействия частиц с $L1_0$ -мартенситом. Получены условия для развития сверхэластичности в широком интервале температур и при высоких температурах за счет вариации ориентации кристалла и термической обработки. Предложена

термодинамическая модель, объясняющая появление стадий на температурной зависимости критических напряжений в области образования мартенсита под нагрузкой в кристаллах с наноразмерными частицами γ' -фазы. Впервые на монокристаллах сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ получен двойной эффект памяти формы, величина и знак которого зависят от условий создания внутренних полей напряжений и ориентации оси кристалла.

Личный вклад соискателя состоит в: выполнении основного объема экспериментальных исследований, проведении теоретических расчетов и оценок, апробации результатов на всероссийских и международных конференциях; совместной с научным руководителем и консультантом постановке задачи исследований, обсуждении и анализе результатов, исследовании микроструктуры кристаллов на просвечивающем электронном микроскопе, формулировке выводов, написании научных статей по теме диссертации.

Диссертация соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи о влиянии ориентации кристалла, размера, формы, объемной доли и числа вариантов наноразмерных частиц γ' -фазы на функциональные свойства монокристаллов ферромагнитного сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ (ат.%), имеющей значение для развития физики конденсированного состояния.

На заседании 17.12.2015 г. диссертационный совет принял решение присудить **Куксгаузен И.В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 8 докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета
Ученый секретарь
диссертационного совета



[Handwritten signature]
[Handwritten signature]

Багров Владислав Гаврилович

Киреева Ирина Васильевна

17.12.2015 г.