

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.078.01 (Д 002.060.01),
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук,
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 21.09.2023 г. № 6/23

О присуждении Пермяковой Инге Евгеньевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Эволюция структуры, свойства аморфных сплавов и аморфно-нанокристаллических композитных материалов при внешних воздействиях» по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 18 мая 2023 г., протокол № 4/23, диссертационным советом 24.1.078.01 (Д 002.060.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49, приказ Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Пермякова Инга Евгеньевна, 5 мая 1979 года рождения, в 2001 г. окончила Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина (физико-математический факультет). В 2004 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Эволюция механических свойств и особенности кристаллизации металлического стекла системы Co-Fe-Cr-Si, подвергнутого термической обработке» по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» в диссертационном совете Д.212.015.04, созданном на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет». На момент подачи документов в Диссертационный совет работала ведущим научным сотрудником в лаборатории многофункциональных материалов Научного центра материаловедения и физики металлов Федерального государственного

унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И.П. Бардина», а с 01.08.2023 г. работает директором Научного центра физического материаловедения Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И.П. Бардина» Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории физики пластической деформации и разрушения перспективных материалов и в лаборатории многофункциональных материалов Научного центра металловедения и физики металлов Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И.П. Бардина» Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Официальные оппоненты: *Хоник Виталий Александрович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный педагогический университет»; *Страумал Борис Борисович* – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук; *Гундеров Дмитрий Валерьевич* – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики твёрдого тела, Институт физики молекул и кристаллов – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»* (г. Москва) в своём положительном отзыве, подписанном заведующим кафедрой металловедения и физики прочности, доктором технических наук, профессором Никулиным Сергеем Анатольевичем и заместителем заведующего кафедрой металловедения

и физики прочности, доктором технических наук, профессором Кудрей Александром Викторовичем и утвержденном проректором по науке и инновациям НИТУ МИСиС, доктором технических наук, профессором Филоновым Михаилом Рудольфовичем указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой установлены важные для науки и производства физические основы формирования свойств, структурных превращений в аморфных сплавах при термической обработке, лазерном облучении, кручении под высоким давлением и разработаны фундаментальные принципы создания аморфно-нанокристаллических композитов с улучшенным комплексом физико-механических характеристик, что в совокупности можно классифицировать как научное достижение в физике конденсированного состояния. Диссертация полностью соответствует всем критериям пп. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Пермякова И.Е., заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Основное содержание диссертации изложено в главах 5 монографий и в 46 статьях рецензируемых научных изданий (перечень ВАК, Web of Science и Scopus). Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Авторский вклад соискателя в опубликованные работы общим объемом 85 п.л. по объёму составляет 60 п.л.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Glezer A.M., Permyakova I.E. Melt-quenched nanocrystals – Boca Raton, FL, USA: Taylor&Francis Group. CISP. CRC Press, 2013. 369p. [Глезер А.М., Пермякова И.Е. Нанокристаллы, закалённые из расплава – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 360 с.]
2. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Громов В.Е., Коваленко В.В. Механическое поведение аморфных сплавов – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. 416 с.
3. Permyakova I., Glezer A. Mechanical behavior of Fe- and Co-based amorphous alloys after thermal action // Metals. 2022. V. 12. N 2. Art. No. 297. P. 1-17.
4. Пермякова И.Е., Глезер А.М., Ковалев А.И., Вахрушев В.О. Трехстадийная эволюция структуры и эффект неаддитивного упрочнения слоистых композитов

- из аморфных сплавов при кручении под высоким давлением // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. Вып. 7. С. 468-474.
5. Permyakova I., Glezer A. Amorphous-nanocrystalline composites prepared by high-pressure torsion // Metals. 2020. V. 10. N 4. Art. No. 511. P. 1-19.
6. Пермякова И.Е., Иванов А.А., Черногорова О.П. Механические свойства лазерно-модифицированного аморфного сплава системы Fe-Ni-B // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 8. С. 28-33.
7. Пермякова И.Е., Иванов А.А., Шеляков А.В. Применение лазерного облучения аморфных сплавов для получения аморфно-нанокристаллических композитов // Известия РАН. Сер. физическая. 2021. Т. 85. № 7. С. 978-983.
8. Пермякова И.Е. Моделирование тепловых полей в аморфных сплавах при импульсной обработке эксимерным лазером // Известия РАН. Сер. физическая. 2020. Т. 84. № 7. С. 1014-1019.
9. Пермякова И.Е. Эффекты травления аморфных сплавов // Известия РАН. Сер. физическая. 2019. Т. 83. № 10. С. 1379-1383.
10. Пермякова И.Е., Глезер А.М., Карпов М.И., Внуков В.И., Штанский Д.В., Горшенков М.В., Щетинин И.В. Аморфизация структуры и механические свойства наноламинатов системы "медь – ниобий" при кручении под высоким давлением // Известия ВУЗов. Физика. 2018. Т. 61. № 3. С. 28-37.
11. Пермякова И.Е., Глезер А.М., Савченко Е.С., Щетинин И.В. Влияние внешних воздействий на магнитные свойства и коррозионную стойкость аморфного сплава $Co_{70.5}Fe_{0.5}Cr_4Si_7V_{18}$ // Известия РАН. Сер. физическая. 2017. Т. 81. № 11. С. 1458-1465.
12. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Федоров В.А. Особенности образования трещин в зоне лазерного отжига аморфных сплавов // Физика и механика материалов. 2016. Т. 25. № 1. С. 62-67.
13. Пермякова И.Е., Глезер А.М., Иванов А.А., Шеляков А.В. Применение лазерного дизайна аморфных сплавов на основе железа и кобальта для создания аморфно-кристаллических композитов // Известия ВУЗов. Физика. 2015. Т. 58. № 9. С. 115-122.
14. Пермякова И.Е., Глезер А.М., Григорович К.В. Деформационное поведение аморфных сплавов системы Co-Fe-Cr-Si-V на начальных стадиях

мегапластической (интенсивной) деформации // Известия РАН. Сер. физическая. 2014. Т. 78. № 10. С. 1246-1250.

15. Глезер А.М., Пермякова И.Е., Манаенков С.Е. Пластифицирующий эффект при переходе из аморфного состояния сплавов в нанокристаллическое // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 2. С. 181-183.

16. Глезер А.М., Манаенков С.Е., Пермякова И.Е. Структурные механизмы пластической деформации аморфных сплавов, содержащих наночастицы кристаллической фазы // Известия РАН. Сер. физическая. 2007. Т. 71. № 12. С. 1745-1750.

На диссертацию и автореферат поступило 13 отзывов: 1) от *Бражкина В.В.* акад. РАН, д.ф.-м.н., директора ФГБУН Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН. 2) от *Беляева С.П.* д.ф.-м.н., в.н.с. кафедры теории упругости, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет». Замечаний нет. 3) от *Мерсона Д.Л.* д.ф.-м.н., директора Научно-исследовательского института прогрессивных технологий, проф. кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет». 4) от *Рубаника В.В.* чл.корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф., зав. лабораторией физики металлов ГНУ «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси». 5) от *Соловьёвой Ю.В.* д.ф.-м.н., зав. кафедрой физики, химии и теоретической механики и *Черепанова Д.Н.* к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет». Замечаний нет. 6) от *Шибкова А.А.* д.ф.-м.н., проф. кафедры теоретической и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина». Замечаний нет. 7) от *Прокошкина С.Д.* д.ф.-м.н., проф., г.н.с. кафедры «Обработка металлов давлением» Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». 8) от *Панфилова П.Е.* д.ф.-м.н., с.н.с., проф. кафедры физики конденсированного состояния и наноразмерных систем Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». 9) от *Варюхина В.Н.* чл.-корр. НАНУ, науч.рук. ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», д.ф.-м.н., проф. и *Ткача В.И.* д.ф.-м.н., с.н.с., г.н.с. ФГБНУ ДОНФТИ.

10) от *Плотникова В.А.* д.ф.-м.н., проф. кафедры общей и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет».

11) от *Белякова А.Н.* д.ф.-м.н., доц., в.н.с. лаборатории механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

12) от *Блиновой Е.Н.* к.ф.-м.н., с.н.с. лаб. МФМ-3 Научного центра металловедения и физики металлов им. Г.В. Курдюмова ГНЦ ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина".

13) от *Кадошцева А.Г.* д.ф.-м.н., г.н.с., зав. лаборатории физики прочности и *Нарыковой М.В.* к.ф.-м.н., с.н.с. ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН.

12 отзывов положительные, в них отражены достоинства работы, отмечена актуальность темы исследования, научная новизна, практическая значимость, в них дается высокая оценка работы. Некоторые из них содержат замечания, не ставящие под сомнение основные выводы и положения, выносимые на защиту. Один отзыв отрицательный. Основные замечания из проступивших отзывов приведены ниже:

- вывод о «синергичном эффекте» сформулирован не совсем четко.
- в автореферате не ясно по какой методике проводилась оценка трещиностойкости тонких аморфных лент толщиной $\approx 20-30$ мкм, которые к тому же охрупчиваются при нагреве?
- в автореферате отсутствует объяснение причин интересного явления - формирование вихрей при смешивании слоёв из аморфных сплавов в ходе мегапластической деформации в камере Бриджмена.
- в анализе механизмов охрупчивания аморфных сплавов следовало бы учесть роль изменений концентрации избыточного свободного объема.
- в реферате не указано, как оценивались скорости охлаждения лент и почему скорость охлаждения ленты $\text{Fe}_{53.3}\text{Ni}_{26.5}\text{B}_{20.2}$ в 2.6 раза выше, чем $\text{Co}_{28.2}\text{Fe}_{38.9}\text{Cr}_{15.4}\text{Si}_{0.3}\text{B}_{17.2}$, хотя толщина лент одинакова 25 мкм.
- Что же представляет собой полоса сдвига в аморфных сплавах?
- В выводе 7 отмечена роль хрома в коррозионной стойкости аморфно-нанокристаллического сплава $\text{Co}_{70.5}\text{Fe}_{0.5}\text{Cr}_4\text{Si}_7\text{B}_{18}$, а в выводе 14 коррозионная стойкость обеспечивается оксидами кобальта.

– имеются вопросы о целесообразности выбора тех или иных сплавов для проведения различных экспериментов.

– сделаны методические замечания, в том числе относительно достоверности данных при использовании магнетометров, при расчете тепловых полей и оценке температур в процессе облучения лазером; при измерении микротвердости композитов из аморфных сплавов.

– раздел «Выводы» слишком большой, а сами пункты также очень обширные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается компетентностью как специалистов в области физики конденсированного состояния, наличием публикаций, близких к теме диссертации, отсутствием совместных публикаций с соискателем, их согласием. Хоник В.А. – эксперт по физике релаксационных и деформационных явлений в металлических аморфных материалах. Страумал Б.Б. – ведущий ученый, изучающий влияния интенсивной пластической деформации на фазовые превращения и свойства металлов, сплавов и композиционных материалов. Гундеров Д.В. – крупный специалист по анализу структуры и механических свойств аморфных сплавов, сплавов с эффектом памяти формы, наноструктурных материалов, полученных интенсивной пластической деформацией. Ведущая организация известна своими достижениями по разработке новых наноструктурных материалов и композитов, технологиям их производства, изучению процессов их деформации, разрушения и упрочнения. Соискатель не работает в данной организации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана научная концепция создания аморфно-нанокристаллических композитов с улучшенным комплексом физико-механических характеристик, применяя два фундаментальных подхода: 1) частичная нанокристаллизация аморфного состояния; 2) частичная аморфизация нанокристаллического состояния.

предложен для ряда аморфных сплавов на основе железа и кобальта оригинальный механизм торможения квазихрупких трещин в окрестности наночастиц, обогащённой атомами металлоидов, объясняющий

пластифицирующий эффект (возрастание параметра трещиностойкости) в области температур перехода в аморфно-нанокристаллическое состояния.

предложено для композитов, сформированных при отжиге аморфных сплавов, объяснение их упрочнения при объёмной доле кристаллов до 0.5: а) разница между модулями упругости аморфной и нанокристаллической фаз; б) взаимодействие полос сдвига с нанокристаллами, выделяющимися в аморфной матрице.

предложена классификация актов взаимодействия наночастиц кристаллических фаз с полосами сдвига в аморфно-нанокристаллических композитах, полученных при отжиге аморфных сплавов (поглощение, огибание, перерезание, торможение, первичная и вторичная аккомодация) и *доказана* связь между размером наночастиц и сменой механизма их взаимодействия с полосами сдвига. *доказана* целесообразность двухэтапного методического подхода к лазерной обработке аморфных сплавов: численное моделирование тепловых полей в процессе облучения для определения необходимых параметров лазерного воздействия → обработка по рассчитанным параметрам. Показано, что такой подход позволяет эффективно модифицировать поверхность и объём аморфных сплавов в зависимости от их теплофизических свойств и энергетических параметров лазерного воздействия: достигать односторонней их кристаллизации, формировать двухслойные и "сэндвичевые" структуры типа "кристаллическое-аморфное-кристаллическое", регулировать толщину кристаллического слоя и частично его фазовый состав, создавать аморфно-нанокристаллические композиты, представляющие собой аморфную матрицу, армированную кристаллическими областями в заданных технологических позициях.

доказано, что постепенное измельчение нанокристаллической структуры наноламинатах Cu-Nb при кручении под высоким давлением сопровождается явлением локальной аморфизации – образованием областей с аморфной структурой, непосредственно связанных с межфазными границами раздела после высокой степени деформации ($N = 4$ оборота).

доказана взаимосвязь синергического эффекта упрочнения аморфно-нанокристаллического композита, сформированного кручением под высоким давлением из чередующихся слоёв аморфных сплавов $Fe_{53.9}Ni_{26.5}B_{20.2}$ и

$\text{Co}_{28.2}\text{Fe}_{38.9}\text{Cr}_{15.4}\text{Si}_{0.3}\text{B}_{17.2}$, (при $4 < N < 9$) со структурно-фазовым состоянием, при котором реализуется межфазное взаимодействие в тонких приграничных областях с образованием боридных фаз.

доказано, что явление охрупчивания в аморфных сплавах связано с двумя структурными причинами: резкий спад сопротивления развитию магистральных квазихрупких трещин и снижение склонности к пластическому течению в аморфной матрице. Двухстадийное снижение микропластичности (т.е. уменьшение поверхностной плотности полос сдвига и их длины) предшествует макроскопическому вязко-хрупкому переходу отожжённых лент аморфных сплавов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: *доказаны* положения диссертации, вносящие существенный вклад в понимание природы аморфного и аморфно-нанокристаллического состояния в условиях термического, деформационного и лазерного воздействия, расширяющие физическое представление об основных принципах корреляции: состав – технология получения и обработки – структура – свойства аморфных сплавов и аморфно-нанокристаллических композитов, углубляющие научные знания о механизмах их пластической деформации и разрушения; применительно к проблематике диссертации результативно *использованы* современные базовые методики проведения экспериментов и исследований, включающих в том числе компьютерное моделирование, позволившие изучить особенности структурно-фазовых превращений в аморфных и аморфно-нанокристаллических композитах и факторы, влияющие на уровень и сочетание их свойств; *изложены доказательства* успешного применения развитых в работе представлений и методических подходов по оптимизации свойств аморфных сплавов и аморфно-нанокристаллических композитов; *изучены факторы*, способствующие формированию сплавов с аморфной и нанокристаллической составляющими структуры, а также *изложены условия* их получения, обеспечивающие улучшенный набор свойств.

Получены новые знания относительно возможностей кручения под высоким давлением для трансформации структуры и свойств аморфных сплавов и наноламинатов Cu-Nb, вносящие вклад в картину процессов структурообразования при сверхвысоких пластических деформациях, способной

непротиворечиво объяснить совокупность накопленных экспериментальных данных в этой развивающейся области физики прочности и пластичности.

Значение полученных соискателем **результатов исследования для практики** подтверждается тем, что: *разработаны* рекомендации по получению аморфно-нанокристаллических композитов разного типа: – при частичной кристаллизации аморфных сплавов в процессе отжига при подобранных температурно-временных режимах; – при вариациях пространственно-распределённых зон лазерного воздействия по поверхности и по сечению лент аморфных сплавов, а также подбором параметров облучения ультрафиолетового эксимерного лазера; – путём "пакетного" чередования слоёв аморфных лент разных по составу и свойствам и их последующего кручения под высоким давлением; – осуществляя частичную аморфизацию кристаллических наноламинатов системы «медь-ниобий» при кручении под высоким давлением в камере Бриджмена.

Разработана совокупность режимов альтернативных обработок для получения оптимального сочетания свойств исследуемых материалов. Наиболее перспективные из них: 1) Облучение УФ лазером ($f = 2$ Гц, $E = 150$ мДж, $W = 0.6$ Дж/см², $0 < n \leq 500$ имп) – для повышения прочностных качеств, упругости и сохранения ненулевой пластичности аморфного сплава Fe_{53.3}Ni_{26.5}B_{20.2}. 2) Малые дозы облучения УФ лазера (до 100 имп.) – для снятия закалочных напряжений и снижения магнитных потерь: при $\lambda = 248$ нм, $\tau = 20$ нс, $f = 2$ Гц, $R_s = 4.2$ мм энергия импульсов E на не должна превышать 155 мДж для аморфного сплава Co_{70.5}Fe_{0.5}Cr₄Si₇B₁₈; ≤ 120 мДж – для Fe₅₀Ni₃₃B₁₇ и ≤ 40 мДж – для Ti₅₀Ni₂₅Cu₂₅. Увеличение значений E спровоцирует кристаллизацию, что может быть использовано для создания конфигураций чередующихся зон аморфной и кристаллической составляющей по поверхности и сечению лент аморфных сплавов. 3) Отжиг ($T_{an} = 833$ К, $t_{выд} = 1.5$ ч) способствует балансу характеристик сплава Fe_{78.5}Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁: максимальной твёрдости, удовлетворительной трещиностойкости, хорошим магнитомягким параметрам. 4) Кручение под высоким давлением ($P = 4$ ГПа, $N = 4$ оборота) позволяет трехкратно увеличить микротвёрдость нанокompозитов Cu/Nb. 5) Кручение под высоким давлением ($P = 6$ ГПа, $v = 1$ об/мин, $N = 4-6$ оборота) обеспечивает

оптимальный уровень трещиностойкости и твёрдости слоистых композитов из аморфных сплавов $\text{Fe}_{53.3}\text{Ni}_{26.5}\text{B}_{20.2}$ и $\text{Co}_{28.2}\text{Fe}_{38.9}\text{Cr}_{15.4}\text{Si}_{0.3}\text{B}_{17.2}$.

Определены характерные видоизменения, по мере перехода из аморфного в кристаллическое состояние, картин деформации и разрушения отожженных аморфных сплавов, в процессе индентирования на эластичной подложке. На основании этого *разработана* методика экспресс-оценки их структурного состояния по составленному с учётом соответствующих температурных интервалов «атласу» зон локального нагружения (наличие / отсутствие полос сдвига, трещин, их взаимное расположение) при разных нагрузках.

Определены перспективы практического использования результатов исследования поведения большого класса аморфных сплавов и аморфно-нанокристаллических композитов при внешних воздействиях: для прогнозирования их температурно-временной стабильности, контроля процессы охрупчивания, поддержания высокого уровня прочностных, магнитомягких характеристик с сохранением ненулевой пластичности.

Представлены рекомендации по управляемой кристаллизации аморфных сплавов посредством лазерной обработки: для улучшения качества поверхности, снятия внутренних напряжений, снижения магнитных потерь, для создания прототипов миниатюрных манипуляторов на основе аморфно-кристаллического быстрозакаленного сплава Ti-Ni-Cu с эффектом памяти формы для задач медицины, биологии, микро- и наноэлектроники.

Экспериментально *доказана* эффективность использования технологии кручения под высоким давлением применительно к аморфным сплавам и Cu-Nb наноламинатам для получения наилучших свойств материалов и создания в них необычных структурных состояний, недостижимых для иных видов обработок.

Установленные закономерности «структура-технология-свойства», предложенные режимы различных экстремальных воздействий на исследованные материалы способствуют развитию фундаментальных основ создания перспективного класса композиционных материалов конструкционного и функционального назначения с заданными служебными характеристиками в промышленных масштабах. Представленные в диссертации результаты могут найти применение при разработке составов, производстве магнитомягких и резистивной лент с аморфной и нанокристаллической

структурой, при изготовлении магнитопроводов, трансформаторов, магнитных экранов и электротехнических изделий из этих сплавов.

Результаты работы *внедрены* в образовательный процесс: разработаны учебное пособие «Перспективные материалы» и специальные курсы лекций «Наноматериалы и нанотехнологии», «Объёмные наноматериалы, полученные закалкой из расплава и интенсивной пластической деформацией» для студентов РТУ МИРЭА.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: научные положения, выносимые на защиту, и основные выводы работы физически обоснованы с использованием адекватной интерпретации полученных экспериментальных данных, сопоставлением результатов оригинальных исследований с имеющимися в современной литературе модельными представлениями и экспериментальными данными других авторов. Результаты получены с использованием современных методов исследования, с применением сертифицированного поверенного аналитического, прецизионного научно-исследовательского оборудования и актуального программного обеспечения; проведением статистической обработки экспериментальных данных; подтверждены воспроизводимостью и масштабной апробацией результатов исследований. Представленные результаты прошли широкое обсуждение на российских и международных научных конференциях; признаны отечественным и зарубежным научным сообществом; многократно были профинансированы научными грантами, проходящими научную экспертизу на стадиях заявок и отчетов; опубликованы в книгах и престижных рецензируемых периодических изданиях. Предложенные решения научной проблемы, выводы не противоречат известным положениям и принципам физики конденсированного состояния и материаловедения.

Личный вклад автора заключается в формулировке проблемы, постановке цели и задач исследований, выборе объектов исследования. Лично или при непосредственном участии автора осуществлялось планирование и проведение экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных, теоретическая интерпретация и формулирование основных выводов, описание и представление результатов в публикациях и при апробации, где вклад автора определяющий.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие **критические замечания**: о перегруженности диссертационной работы большим объемом экспериментальных данных и выводов; о дискуссионном вопросе по поводу строения полос сдвига и механизме пластической деформации в аморфных сплавах; о необходимости детальных исследований по анализу и учету роли ударного воздействия лазера при облучении аморфных сплавов.

Соискатель Пермякова И.Е. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, согласилась с замечаниями и рекомендациями, и привела собственную аргументацию в защиту представленных результатов и научных положений:

- Диссертация вмещает результаты, полученные в течение 20 лет активной исследовательской деятельности.
- К выводам был скрупулёзный подход, поэтому они получились объемные и обстоятельные. Следовало их оформить в более лаконичной форме.
- Полосы сдвига являются основополагающим элементом пластического течения аморфных сплавов при доступном в настоящее время уровне разрешения элементов структуры. Они имеют толщину 20-100 нм, их число и ориентация определяется геометрией пластической деформации, а остальная область аморфной матрицы деформируется упруго. Деформация внутри полос сдвига очень велика и сопровождается химическим разупорядочением (выявляется избирательным травлением) и дилатацией.

Общепринятой единой теории деформации аморфных сплавов нет. Согласно дислокационному механизму пластической деформации дислокация в аморфных сплавах – это по сути сам фронт сдвига и поле деформации вокруг него. Это обобщенная дислокация, состоящая из микродислокаций, вектор Бюргерса которых изменяется по величине, по направлению вдоль фронта сдвига, т.е. длина дислокации имеет размеры атомного масштаба. Вокруг ядра таких дислокации формируется микрообъем, который снижает вязкость аморфного сплава и способствует вязкому течению. Согласно другой модели (Argon A.S.) существуют зоны сдвиговой трансформации - кооперативные перестройки групп атомов, аналогичных образованию дислокационных петель. В результате их активации под напряжением могут образовываться полосы сдвига за счет продвижения зон сдвиговых трансформаций сквозь аморфный сплав. При деформации полоса сдвига разрыхляется, размягчается и стимулирует дальнейшее развитие. Изучение полос сдвига перспективное направление последующих исследовательских работ. – В диссертации, на примере аморфного

сплава системы Co-Fe-Cr-Si-B было продемонстрировано, что лазерная обработка более эффективна для поверхностного упрочнения чем термический отжиг: значения твердости сплава при облучения УФ эксимерным лазером существенно выше, чем при обычном печном отжиге. В работе дано объяснение, что это связано не только с лазерным нагревом, но именно с вкладом ударного воздействия сверхкоротких импульсов, усиливающим эффект упрочнения.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния (отрасль науки – физико-математические).

На заседании 21 сентября 2023 года диссертационный совет принял решение: за комплексное изучение физических закономерностей формирования свойств, структурных превращений в аморфных сплавах при внешних воздействиях и разработку физических принципов создания аморфно-нанокристаллических композитов с улучшенными физико-механическими характеристиками, что в совокупности можно классифицировать как научное достижение в физике конденсированного состояния и индустрии наноматериалов, направленное на решение масштабной для страны научной проблемы получения новых многофункциональных материалов и развития прогрессивных технологий их обработки, присудить Пермяковой И.Е. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав Совета, проголосовали: за – 15, против – 1, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
Диссертационного совета
24.1.078.01, д.т.н., проф.

Поварова Кира Борисовна

Ученый секретарь
Диссертационного совета
24.1.078.01, д.т.н., доц.

Костина Мария Владимировна

«25» сентября 2023 г.

Подписи Поваровой К.Б. и Костиной М.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИМЕТ РАН, к.т.н.



Фомина Ольга Николаевна