

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Чирковой Валентины Владимировны
«Формирование нанокристаллической структуры в гетерогенных аморфных сплавах на
основе кобальта, железа и алюминия», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика
конденсированного состояния».

Актуальность диссертации

Современные требования к материалам для различных отраслей промышленности (авиации, энергетике, электронике и др.) обуславливают необходимость разработки новых сплавов с уникальными свойствами, сочетающими высокую прочность, пластичность, коррозионную стойкость и функциональные характеристики (магнитные, трибологические, коррозионные). Аморфно-нанокристаллические сплавы представляют собой перспективный класс материалов и представляет значительный научный и практический интерес благодаря их уникальному набору физико-механических свойств. Гетерогенные аморфные сплавы системы на основе кобальта, железа и алюминия обладают высокой перспективой применения в качестве функциональных материалов для микроэлектромеханических систем (МЭМС), магнитных сенсоров и устройств энергопреобразования. Однако процессы кристаллизации в таких системах остаются недостаточно изученными, особенно в условиях контролируемого термообработки и воздействия внешних факторов (деформации, ультразвука). В связи с этим, диссертационная работа Чирковой В.В., направленная на систематическое исследование механизмов формирования нанокристаллической структуры в аморфных сплавах с гетерогенной аморфной структурой, содержащей неоднородности химического состава и/или атомной плотности, безусловно, обладает **новизной** и **актуальностью**.

Структура диссертации

Полный объем диссертационной работы составляет 139 страницу, включая 1 таблицу и 55 рисунков. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка цитируемой литературы из 160 наименований.

Введение включает в себя обоснование темы исследования, цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту, научную новизну и практическую значимость, сведения об апробации результатов, личном вкладе, структуре и объеме диссертации.

В **первой главе** представлен литературный обзор проблемы. Приводятся информация о моделях структуры аморфных сплавов, о характере структурных превращений при термических и деформационных воздействиях, а также данные о свойствах аморфных сплавов.

Во **второй главе** описаны методы получения аморфных сплавов, а также методы воздействия, приводящие к кристаллизации аморфного состояния сплавов. Сильной стороной работы является то, что подобран большой спектр аморфных сплавов для исследования (сплавы на основе кобальта, железа и алюминия). В данной главе так же приведены методы структурно-фазового анализа и исследования тепловых свойств сплавов, использованных в работе.

В **третьей главе** приведены результаты исследования кристаллизации аморфных сплавов, содержащих неоднородности химического состава. Получена информация об

особенностях возникновения нанокристаллической структуры в сплавах на основе кобальта, легированных компонентами с различным типом кристаллической решетки (Nb, Ti), размером элементарной ячейки (Mn), растворимостью в основном компоненте сплава (Ni). Показано, что размеры и количество нанокристаллов в аморфной матрице зависят от типа кристаллической решетки легирующего компонента и его концентрации. Установлено, что возможность образования нанокристаллов с ОЦК решеткой зависит от размера элементарной ячейки легирующего компонента и уменьшается при увеличении объема ячейки.

В **четвертой главе** содержатся результаты исследования кристаллизации аморфных сплавов, содержащих неоднородности атомной плотности. Методами рентгеноструктурного анализа, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии проанализированы структурные изменения при термической обработке предварительно деформированных прокаткой и обработанных ультразвуком аморфных сплавов на основе кобальта, железа и алюминия, в том числе и сплавов с покрытием тантала. Выявлено, что увеличение доли нанокристаллов, образующихся в аморфных сплавах при термообработке, наблюдается и при предварительной прокатке, и при ультразвуковой обработке. Показано, что нанесение покрытия на аморфные сплавы позволяет сохранить области повышенного содержания свободного объема, что приводит к заметному ускорению кристаллизации и образованию большей доли нанокристаллической фазы.

В конце диссертации представлено **заключение**, благодарности и **список литературы**.

Научная новизна полученных результатов.

Среди основных результатов, составляющих научную новизну работы, можно выделить следующие:

1. Выявлен механизм образования нанокристаллической структуры в гетерогенной аморфной фазе, базирующийся на родстве ближнего порядка в упорядоченных областях гетерогенной аморфной фазы и структуры первичной фазы, образующейся на начальной стадии кристаллизации.
2. Обнаружено влияние структуры легирующих компонентов (Fe, Nb, Mn – ОЦК, Ti – ГПУ, Ni – ГЦК) на кристаллизацию аморфных сплавов на основе кобальта (система Co-Si-B).
3. Установлена зависимость параметров формирующейся кристаллической структуры (фазовый состав, доля и размер нанокристаллов) от типа кристаллической решетки легирующего компонента.
4. Обнаружено влияние предварительной деформации на образование нанокристаллов при последующей термообработке и установлена зависимость доли формирующейся кристаллической фазы от степени деформации сплавов с разными упругими характеристиками (аморфные сплавы систем Co-Si-B-Fe-Nb, Al-Ni-Gd).
5. Выявлена роль покрытия (Ta) в процессах образования нанокристаллов в исходных и деформированных аморфных сплавах (аморфные сплавы систем Co-B-Fe-Nb, Fe-Si-B, Al-Ni-Gd).

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе, обоснованность выводов и научных положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений, так как они обеспечены корректной постановкой задачи, использованием современных методов исследования (рентгенофазовый анализ, просвечивающая и растровая электронная микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия). Полученные

результаты грамотно статистически обработаны и нашли свою трактовку в полном соответствии с современными концепциями физики конденсированного состояния. Результаты и выводы диссертации были апробированы на многочисленных российских и международных конференциях и опубликованы в 7 публикациях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, определенных ВАК.

Представленные результаты представляют интерес как для фундаментальной науки, так и с **практической точки зрения**, в частности в области создания новых многофункциональных аморфно-нанокристаллических композитов, а также в сфере микроэлектромеханических систем, в частности в качестве материалов сердечников трансформаторов, в электродвигателях, в импульсных источниках питания. Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в научных и производственных организациях России (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ИМЕТ РАН, ИФМ УрО РАН и др.), а также в учебном процессе ведущих высших учебных заведений РФ (МГУ, РТУ МИРЭА, НИТУ «МИСиС», НИЯУ МИФИ и др.).

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации не представлены результаты аттестации структуры аморфных сплавов в исходном состоянии методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии. Отсутствие рентгенограмм аморфных сплавов в исходном состоянии (глава 2) затрудняет проведение сравнительного анализа представленных в диссертации результатов.

2. В диссертации для аморфных сплавов на начальной стадии кристаллизации на рентгенограммах проводилось разделение перекрывающихся максимумов от кристаллической фазы и диффузного рассеяния от аморфной фазы. На основании полученных данных в работе делается оценка величины объемной доли кристаллической фазы и размера нанокристаллов в сплавах. Хорошо известно, что задача разделения суперпозиции аморфного гало и отражения от кристаллической фазы является сложным методическим рентгеноструктурным вопросом. Из текста диссертации непонятно, на основании какого математического аппарата проводилось разделение суперпозиции дифракционных отражений и какая погрешность такого анализа? Особенно этот вопрос актуален для рентгеновских результатов на рисунках 4.5 и 4.7, где на рентгенограммах наблюдается только уменьшение полуширины первого диффузного гало и никаких дифракционных линий от кристаллических фаз не наблюдается.

3. В тексте диссертации не указан доверительный интервал определения значений объемной доли кристаллической фазы, среднего размера нанокристаллов, энергии активации кристаллизации для исследуемых сплавов.

4. В работе встречаются опечатки и стилистические ошибки, а также, в ряде случаев, не представлены результаты расшифровки микродифракционных ПЭМ изображений (например, рис 4.11, 4.16 и др.).

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Заключение.

Считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. В ней был получен ряд принципиально важных и новых результатов, сформулированы и

обоснованы научные положения и выводы, которые позволяют прояснить сложную природу процессов образования нанокристаллов в гетерогенной аморфной фазе, содержащей неоднородности химического состава и/или атомной плотности. Представленные результаты, их обоснование и анализ, безусловно, будут стимулировать дальнейшие исследования свойств структуры аморфных сплавов, а также их применения. Автореферат диссертации и публикации автора в высоко рейтинговых научных журналах полностью отражают научную новизну и содержание работы.

Диссертационная работа Чирковой В.В. «Формирование нанокристаллической структуры в гетерогенных аморфных сплавах на основе кобальта, железа и алюминия», полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» и отвечает требованиям, п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Чиркова Валентина Владимировна, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», доцент, профессор кафедры наноэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

03 Сентябрь 2025 г.



Сундеев Роман Вячеславович

Согласен на обработку персональных данных

Подпись Сундеева Р.В. заверяю

Ученый секретарь РТУ МИРЭА



Н.В. Милованова

Контактная информация:

Почтовый адрес: 119454 г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

Адрес электронной почты: sundeev55@yandex.ru