

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2
Тел.: +7 (495) 777-93-01; факс: +7 (495) 777-93-00
e-mail: chermet@chermet.net
www.chermet.net

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
по производству ГНЦ ФГУП
«ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», к.т.н.



С.Ю. Манегин

«12» мая 2025 г.

09 » 06 2025 год № 2156-3/10
на № от

ОТЗЫВ

ведущей организации

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной
металлургии им. И.П. Бардина»

на диссертационную работу Мильковой Дарии Александровны
«Разработка аморфных магнитомягких материалов на основе железа с высоким
содержанием металлов», представленную на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертации

В современной электротехнической отрасли аморфные металлические сплавы представляют собой перспективный класс материалов, демонстрирующих уникальные магнитные характеристики. Их применение обусловлено высоким комплексом свойств: низкая коэрцитивная сила, высокая магнитная проницаемость, малые потери на перемагничивание. Однако, существует определённое ограничение: присутствие значительного количества металлоидов в структуре аморфных материалов препятствует достижению таких же высоких показателей намагниченности насыщения, какие наблюдаются у кристаллических аналогов. Для электротехнических изделий критически важно иметь высокий уровень намагниченности насыщения, поскольку это позволит уменьшить габариты готовой продукции.

Существует возможность повышения намагниченности насыщения путём сокращения содержания металлоидов в составе материала, однако такой подход отрицательно сказывается на стеклообразующей способности материалов. В связи с этим особую актуальность приобретает задача по оптимизации составов аморфных материалов с сохранением высоких технологических характеристик при увеличении содержания металлов.

Именно поэтому диссертационная работа Мильковой Д.А., посвященная фундаментальному изучению аморфных магнитомягких материалов на основе железа, представляет собой значительный вклад в развитие современного материаловедения. Работа направлена на решение ключевой научно-технической задачи по созданию новых материалов с улучшенным комплексом магнитных свойств.

Полученные результаты могут найти применение в разработке высокоэффективных изделий для электротехнической сферы, что подтверждает высокую актуальность исследований.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, в котором представлены основные результаты и выводы, библиографического списка из 132 наименований и включает 111 страниц машинописного текста, содержащего 54 рисунков и 17 таблиц.

Во введение сформулирована актуальность научной работы и ее практическая значимость.

В первой главе изучены и структурированы данные о металлических стеклах и их способах получения, обобщены данные о влиянии состава материала, его термообработки на конечный комплекс свойств.

Во второй главе представлены составы исследуемых сплавов и описаны методики исследования данных материалов.

В третьей главе рассмотрены закономерности влияния ниобия в сплавах на железоникелевой основе $(\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5})_{76-80}\text{B}_{11-12}\text{P}_{4-5}\text{Si}_3\text{Nb}_{0-3}\text{Cu}_{0-1}$ на магнитные свойства.

В четвертой главе рассмотрены закономерности влияния соотношения железа и кобальта, общего содержания ферромагнитных элементов FeCo в составе аморфных сплавов и режимов их термической обработки на характер кристаллизации и магнитные свойства.

В пятой главе рассмотрены закономерности влияния малой добавки углерода и фосфора на стеклообразующую способность сплавов $(\text{FeCo})_{83-85}\text{B}_{13-15}\text{Si}_1(\text{P,C})_1$, характеристические температуры и магнитные свойства, определены режимы термообработки исследуемых материалов.

Текст диссертации составлен логично, грамотно, материал изложен последовательно. Поставленные цели соответствуют полученным результатам, сформированным в выводах.

Научная новизна работы

Получено большое количество новых результатов, исследовано 38 перспективных сплавов на основе железа. К наиболее значимым результатам можно отнести следующие:

Установлено, что в сплавах $(\text{Fe}_{0,5}\text{Ni}_{0,5})_{76-80}\text{B}_{11-12}\text{P}_{4-5}\text{Si}_3\text{Nb}_{0-3}\text{Cu}_{0-1}$ легирование ниобием до 2 ат.% эффективно с целью снижения коэрцитивной силы и сохранения высокой намагниченности насыщения около 0,98 Тл. Добавка ниобия повышает термическую стабильность сплавов при первичной кристаллизации ГЦК фазы, что

обусловлено низкой скоростью диффузии и малой растворимостью ниобия в ГЦК фазе. Установлено, что формированием наноразмерной ГЦК фазы (FeNi) снижает уровень магнитных свойств, из-за малой объемной доли этой фазы и высокой плотности двойников в ее структуре;

Установлены концентрационные зависимости стеклообразующей способности сплавов $(\text{FeCo})_{80-85}\text{B}_{14-19}\text{Si}_1$ и $(\text{FeCo})_{83-85}\text{B}_{13-15}\text{Si}_1(\text{C,P})_1$. Предельное содержание металлов в составах FeCoBSi и с малой добавкой углерода, до которого обеспечивается формирование полностью аморфной структуры, составляет 84 ат.%. Малая добавка фосфора вместо бора в составе сплавов $(\text{FeCo})_{83-85}\text{B}_{13-15}\text{Si}_1\text{P}_1$ приводит к увеличению стеклообразующей способности материалов, аморфное состояние достижимо в сплавах при содержании металлов до 85 ат.% включительно;

Установлены закономерности процессов кристаллизации. Кристаллизация эвтектического типа характерна материалам $(\text{FeCo})_{80}\text{B}_{19}\text{Si}_1$. Процесс кристаллизации сопровождается формированием эвтектики ($\alpha\text{-(Fe,Co)} + \text{Fe}_3\text{B}$) с последующим распадом метастабильного борида (Fe_3B) на стабильный (Fe_2B). У материалов трех систем при содержании металлов 82-85 ат.% происходит изменение типа кристаллизации с эвтектического на первичный. При температурах первой экзотермической реакции наблюдается формирование твердого раствора $\alpha\text{-(Fe,Co)}$ из аморфной фазы, в диапазоне температур второго превращения происходит формирование стабильного борида Fe_2B ;

Установлено, что добавление фосфора вместо бора в сплавах $(\text{FeCo})_{83-85}\text{B}_{13-15}\text{Si}_1\text{P}_1$ способствует повышению термической стабильности к кристаллизации при температуре отжига ($T_{x1}-80$), что связано с низкой растворимостью фосфора в $\alpha\text{-(FeCo)}$ и низкой скоростью диффузии в аморфной матрице по сравнению с бором, обусловленной большим размером атома фосфора.

Данные результаты являются важными для понимания влияния легирующих элементов в аморфных материалах на магнитные свойства, процессы кристаллизации и создания новых аморфных магнитомягких сплавов для электротехнической сферы.

Полученные результаты открывают новые перспективы для дальнейшего развития исследований в области физики магнитных явлений и материаловедения и позволяют разрабатывать новые составы с повышенным комплексом свойств, путем оптимизации составов и применения низкотемпературного отжига.

Обоснованность и степень достоверности результатов и выводов по работе не вызывает сомнений. Их обоснованность определена за счет использования передовых технологий и оборудования, обработки и анализа экспериментальных данных. В работе представлен большой объем экспериментальных данных, получено 38 сплавов.

По материалам диссертации опубликовано 2 печатных работы, входящие в международные базы данных Web of Science, Scopus, получен 1 патент РФ. Основные результаты диссертации также были представлены на научно-технических конференциях и конкурсах.

Значимость для науки и производства, полученных автором диссертации результатов, сопоставление полученных результатов с уровнем современной науки

В диссертационной работе разработаны новые перспективные сплавы $(\text{FeCo})_{82-84}\text{B}_{15-17}\text{Si}_1$ с режимами термической обработки ($T_{\text{х1}}-80$) с выдержкой $(0,12-0,9) \cdot 10^3$ с и сплавы $(\text{FeCo})_{83-84}\text{B}_{14-15}\text{Si}_1\text{P}_1$ с режимами термической обработки ($T_{\text{х1}}-80$) с выдержкой $(0,12-1,5) \cdot 10^3$ с, обеспечивающие комплекс магнитных свойств: коэрцитивная сила (H_c) 6-17 А/м, намагниченность насыщения (M_s) 1,8-2,0 Тл, начальная магнитная проницаемость (μ) при 1 кГц $(3-13) \cdot 10^3$. По уровню магнитных свойств разработанные составы превосходят промышленные аналоги АМАГ 321, Metglas 2605SA1, 1 СР. Ранее у аморфных и нанокристаллических материалов не удавалось получить намагниченность насыщения выше 1,8 Тл.

У исследуемых в диссертационной работе железокобальтовых металлических лент удалось получить высокий комплекс свойств из-за оптимизации составов за счет высокого содержания ферромагнитных элементов в сравнении с другими сплавами и при значительном преобладании В над Si. В связи с этим разработанные составы могут найти применение в электротехнической сфере.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

В ходе проведенных исследований был получен значительный объем научно-технических результатов, представляющих практический интерес для широкого круга специалистов в области физики магнитных явлений и материаловедения. Полученные результаты открывают новые перспективы в разработке и производстве функциональных материалов с заданными магнитными свойствами.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в ряде научных организаций и предприятий России: ООО НПК «Автоприбор», ПАО «Ашинский метзавод», ПАО «Мстатор», ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, МГУ, НИТУ МИСИС, ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина.

Кроме того, результаты работы могут быть востребованы в других научно-исследовательских институтах, высших учебных заведениях и производственных предприятиях, специализирующихся на разработке и производстве магнитных материалов и устройств на их основе. Это включает в себя как крупные промышленные предприятия, так и малые инновационные компании, работающие в сфере высоких технологий.

Оценка содержания диссертации

Диссертация Мильковой Д.А. является целостной и законченной. Работа хорошо структурирована и стиль изложения соответствует научным стандартам.

Автореферат точно отражает содержание диссертации и ее основные идеи.

Диссертационная работа «Разработка аморфных магнитомягких материалов на основе железа с высоким содержанием металлов» соответствует специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Объем и содержание диссертационной работы по научной новизне и практической значимости соответствует требованиям ВАК Российской Федерации.

Замечания по работе:

1) В работе недостаточно уделено внимания структурному состоянию сплавов при низких температурах;

2) Отсутствие достаточного объема экспериментальных данных о стабильности структуры и температуре вязко-хрупкого перехода сплавов не позволяют в полной мере оценить температурный диапазон использования сплавов.

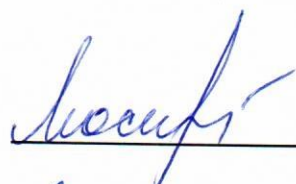
Заключение

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку работы. Работа выполнена на актуальную тему, на высоком научном уровне, полученные результаты имеют научную новизну и практическую значимость. Достоверность результатов не вызывает сомнений.

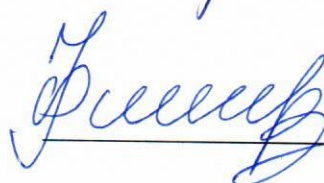
Диссертационная работа «Разработка аморфных магнитомягких материалов на основе железа с высоким содержанием металлов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», а ее автор Милькова Дария Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Доклад Мильковой Дарии Александровны заслушан и обсужден, а настоящий отзыв утвержден на расширенном заседании НТС ИМФ и НПЦПС ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина «13» мая 2025 года, протокол заседания №10/1 от «13» мая 2025 года.

Ученый секретарь, к.т.н.

 Т.П. Москвина

Отзыв подготовили:
Заместитель директора ИФМ,
к.ф.-м.н.

 В.П. Филиппова

Начальник лаборатории
Магнитных материалов НЦПС,
к.ф.-м.н.

 П.С. Могильников