

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БАЙКОВА РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК (ИМЕТ РАН)**

119334, Москва, Ленинский пр., 49, Тел. (499) 135-20-60, факс: 135-86-80, E-mail: [imet@imet.ac.ru](mailto:imet@imet.ac.ru) <http://www.imet.ac.ru>  
ОКПО 02698772, ОГРН 1027700298702 ИНН/КПП 7736045483/773601001



**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель директора ИМЕТ РАН  
по научной работе, д.т.н.

В.С. Юсупов

«21» мая 2026 г.

**ОТЗЫВ  
ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Саракуевой Аиды Эюповны  
«Физико-технологические характеристики микропроводов на основе  $Co$  и  
их использование в температурных датчиках сопротивления»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических  
наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства  
материалов и приборов электронной техники

**Актуальность темы диссертационной работы**

Аморфные ферромагнитные микропровода (АФМ) в стеклянной оболочке, изготавливаемые методом Тейлора–Улитовского, имеют диаметр жилы 5–50 мкм. Благодаря сочетанию малых размеров, высокой механической прочности и таких уникальных свойств, как магнитная бистабильность и гигантский магнитный импеданс, АФМ являются перспективными чувствительными элементами для датчиков магнитного поля, механических напряжений и температуры.

В известных работах микропровода рассматриваются как чувствительные элементы температурных датчиков, принцип действия которых основан на температурной зависимости магнитных характеристик: поля переключения в магнитобистабильных структурах и амплитуды высших

гармоник намагниченности вблизи точки Кюри для составов с низкой температурой фазового перехода.

В диссертации предложен альтернативный подход, использующий электрическое сопротивление микропровода в качестве рабочей характеристики датчика, что позволяет полностью исключить необходимость во внешнем магнитном поле. В работе исследуется влияние химического состава и структурного состояния микропроводов системы Co-Fe-Cr-Si-B на характер температурной зависимости их электросопротивления и величину температурного коэффициента сопротивления. Тема диссертации актуальна, так как направлена на решение практически значимой задачи по созданию миниатюрных, быстродействующих и технологически простых датчиков температуры для встраиваемых систем мониторинга в микроэлектронике и приборостроении.

Тематика диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации в области создания современной элементной базы микроэлектроники и прецизионного приборостроения, а также задачам импортозамещения в сфере сенсорных систем.

### **Структура и основное содержание диссертации**

*Первая глава* посвящена литературному обзору методов получения, структуры и свойств аморфных ферромагнитных микропроводов в стеклянной оболочке, а также анализу существующих подходов к созданию миниатюрных температурных датчиков на их основе.

*Вторая глава* содержит описание объектов и методов исследования. Приведены характеристики исследуемых микропроводов, описаны экспериментальные установки и методики измерения их магнитных и электрических свойств, а также методы анализа фазового состояния материала.

*Третья глава* посвящена исследованию влияния содержания хрома на структурно-фазовые и электрические свойства микропроводов системы Co-

Fe–Cr–Si–В в аморфном и кристаллизованном состоянии. В главе обоснован выбор кристаллизованного микропровода состава  $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  как наиболее эффективного материала для создания температурного датчика. Установлено, что данный состав обеспечивает оптимальный баланс характеристик: сохранение высокого уровня электрического сопротивления, необходимого для обеспечения чувствительности сенсора, при достижении максимального значения ТКС.

*Четвертая глава* посвящена разработке конструкции и технологии изготовления температурного датчика сопротивления на основе кристаллизованного ферромагнитного микропровода. Описана методика кристаллизации микропровода методом джоулева нагрева непосредственно на термостабильной плате. Приведены результаты калибровки датчика, подтверждающие линейную зависимость сопротивления от температуры в исследуемом диапазоне.

*Пятая глава* посвящена практическому применению разработанного датчика. Предложены и экспериментально обоснованы методики определения теплопроводности композиционных материалов, а также компенсации температурного дрейфа ГМИ-датчиков с использованием созданного температурного сенсора сопротивления.

### **Научная новизна результатов работы**

1. Впервые установлены закономерности влияния структурно-фазовых превращений и состава микропроводов Co–Fe–Cr–Si–В на их свойства, согласно которым кристаллизация и снижение концентрации хрома обеспечивают увеличение температурного коэффициента сопротивления на порядок.
2. Разработан миниатюрный термометр сопротивления на основе кристаллизованного микропровода  $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ , обладающий высоким быстродействием и линейной зависимостью сопротивления от температуры.

3. Предложены и экспериментально обоснованы методики применения разработанного термометра сопротивления для определения теплопроводности композиционных материалов и компенсации температурного дрейфа ГМИ-датчиков.

Сформулированные в диссертации выводы и рекомендации по выбору состава микропроводов системы Co–Fe–Cr–Si–В носят практический характер и могут быть непосредственно использованы при конструкции резистивных температурных датчиков.

### **Сопоставление результатов с уровнем современной науки**

В современной литературе электрические свойства аморфных ферромагнитных микропроводов системы Co–Fe–Cr–Si исследовались преимущественно как сопутствующая характеристика при изучении магнитных явлений. Систематического исследования влияния химического состава и структурно-фазового состояния на температурную зависимость электросопротивления и величину ТКС для микропроводов данной системы в литературе не представлено.

Принципиальное отличие диссертации Саракуевой А.Э. состоит в комплексном подходе. Впервые для микропроводов системы Co–Fe–Cr–Si–В проведено систематическое исследование электрофизических свойств во всем диапазоне структурных состояний, от исходного аморфного до полностью кристаллизованного, с учетом влияния содержания хрома. Установлено, что полная кристаллизация материала меняет механизм электропроводности. В аморфном состоянии рассеяние носителей определяется структурным беспорядком, тогда как в кристаллическом доминирует фононный механизм, характерный для металлических проводников. Именно этот переход обуславливает десятикратный рост ТКС. Полученные закономерности легли в основу целенаправленного выбора состава и структурного состояния материала для термочувствительного элемента. Это переводит микропровода

системы Co–Fe–Cr–Si–B из области магнитных сенсоров в область прецизионных резистивных датчиков температуры.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы определяется возможностью прямого применения полученных результатов в области микроэлектронного приборостроения. Разработанный температурный датчик сопротивления на основе кристаллизованного микропровода  $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  пригоден для интеграции во встраиваемые системы мониторинга, требующие малых габаритов и высокого быстродействия.

Предложенная методика определения теплопроводности может быть использована в материаловедении для контроля качества композиционных материалов в процессе их производства. Алгоритм температурной компенсации ГМИ-датчиков позволяет обеспечить стабильность их работы в диапазоне 20–80 °С, что востребовано при создании систем высокоточного измерения магнитных полей.

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность и обоснованность результатов подтверждены использованием комплекса взаимодополняющих методов: рентгеноструктурного анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, магнитометрии и четырехзондового метода измерения сопротивления. Воспроизводимость данных обеспечена многократными испытаниями образцов из разных партий. Адекватность методик верифицирована сравнением с результатами стандартного метода лазерной вспышки и показаниями эталонных приборов.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать на приборостроительных предприятиях при разработке миниатюрных датчиков сопротивления для встраиваемых систем мониторинга, а также в

материаловедческих лабораториях для контроля теплопроводности композиционных материалов по предложенной методике.

Полученные результаты и разработанные технологические подходы могут быть внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность следующих организаций:

ИМЕТ РАН (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН): в части исследования структурно-фазовых превращений в аморфных металлических сплавах;

ИЗМИРАН (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН), Лаборатория криогенной магнитометрии – для интеграции разработанного датчика в системы компенсации температурного дрейфа магнитометров;

НИТУ МИСИС (Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»): в учебном процессе и научных исследованиях в области функциональных материалов.

Для промышленного освоения технологии изготовления миниатюрных датчиков сопротивления на основе ферромагнитных микропроводов результаты диссертационной работы рекомендуется внедрить на предприятиях, специализирующихся в области магнитных и криоэлектронных систем. В частности, ООО «МаКриЭл системс» (г. Москва, г. Троицк) уже подтвердило практическую применимость разработанных датчиков: изготовлена опытная серия ТДС на основе микропровода  $\text{Co}_{73}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ , проведена их калибровка и успешно апробирована методика компенсации температурной нестабильности ГМИ-датчиков (Акт о внедрении от 09.03.2026).

### **Замечания по диссертационной работе**

К диссертационной работе Саракуевой А.Э. имеются замечания:

*Замечание 1.* В диссертации утверждается, что пятикратный рост ТКС при уменьшении содержания хрома обусловлен заменой борида  $\text{Co}_{23}\text{B}_6$  на

Co<sub>2</sub>B. Однако количественный фазовый анализ в работе не проводился – объемные доли фаз не определены. В отсутствие этих данных предложенный механизм носит качественный характер и не подкреплён прямой количественной связью.

**Замечание 2.** Алгоритм температурной компенсации ГМИ-датчика построен по двум калибровочным точкам магнитной индукции (0 и 95 200 нТл). При этом в таблице 5.3 при эталонном значении  $B = 0$  нТл расчётный алгоритм даёт  $B_{\text{расч}} = 2169$  нТл – систематическая ошибка нуля, которая в работе не прокомментирована. Природа и величина данной погрешности требуют дополнительного анализа

**Замечание 3.** Верификация метода определения теплопроводности проведена на трёх образцах одной системы (BN/каучук) в узком диапазоне значений 1,05–1,80 Вт/(м·К), тогда как заявленный рабочий диапазон метода составляет 0,1–10 Вт/(м·К). Корректность модели в крайних точках диапазона экспериментально не подтверждена, что ограничивает возможность оценки универсальности предложенной методики.

### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертация Саракуевой Аиды Эюповны является научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно.

По теме исследования опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также 6 тезисов докладов. Получено 3 объекта интеллектуальной собственности: патент РФ на изобретение, заявка на изобретение и свидетельство на ноу-хау. Основные результаты доложены на 6 международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к кандидатским диссертациям. Структура изложения логична, иллюстративный материал нагляден, библиографический список составлен корректно. Содержание автореферата отражает основные положения диссертации.

Представленные результаты и положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Предложенные в работе технологические решения обладают научной новизной и практической ценностью. Диссертация отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Саракуева Аида Эюповна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Диссертационная работа была представлена автором и обсуждена на научном семинаре лаборатории Проблем металлургии комплексных руд ИМЕТ РАН 20 мая 2026 г. (протокол № 1). По результатам обсуждения работа была рекомендована к защите.

**Отзыв составил:**

Ведущий научный сотрудник  
ФГБУН ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова,  
к.э.н.

  
\_\_\_\_\_ Б.Г. Балмаев

**Сведения о ведущей организации**

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Сокращенное наименование: ФГБУН ИМЕТ РАН

Почтовый адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49

Телефон: +7 (499) 135-20-60

Электронная почта: [imet@imet.ac.ru](mailto:imet@imet.ac.ru)

Сайт: <http://www.imet.ac.ru>