

Министерство промышленности и торговли  
Российской Федерации  
Государственный научный центр  
Российской Федерации



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

Федеральное государственное унитарное предприятие  
(ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина»)

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2  
Тел. (495) 777-93-01; Факс (495) 777-93-00  
ИНН/КПП 7701027596/770101001

E-mail: [chermet@chermet.net](mailto:chermet@chermet.net)

[www.chermet.net](http://www.chermet.net)

18.09. 2018 г. № 48/1146

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель генерального директора  
ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», к. т. н.



В. А. Углов

2018 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Вомпе Татьяны Алексеевны «Разработка и исследования низкокобальтовых магнитотвердых Fe-Cr-Co сплавов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01-Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

### Актуальность темы диссертации

Магнитотвердые материалы используются для изготовления постоянных магнитов, активных частей роторов синхронных гистерезисных электродвигателей (СГД), а также в носителях магнитной записи.

В настоящее время основными материалами для изготовления постоянных магнитов являются сплавы, содержащие редкоземельные металлы (РЗМ) систем РЗМ – Fe-B и РЗМ – Co. Эти материалы обладают экстремальными магнитными свойствами, а технология их производств, основанная на методах порошковой металлургии, позволяет изготавливать магниты необходимых типоразмеров. Использование этих сплавов сдерживается высокой стоимостью РЗМ и сложностью технологии их изготовления.

Между тем, для целого ряда применений нет необходимости изготавливать магниты с экстремальными свойствами, а требуются постоянные магниты с определенным сочетанием «средних» магнитных характеристик и высокой пластичности. В первую очередь - это сплавы созданные на основе системы Fe-Cr-Co. Разработанные в 70-х годах прошлого века сплавы этой системы обладают уникальным для магнитотвердых сплавов сочетанием магнитных и механических свойств. Высокая пластичность этих материалов позволяет изготавливать из них магниты со «средними» магнитными свойствами методами классической металлургии по схеме выплавка – пластическая деформация – термическая обработка. Исследования сплавов этой системы, как материалов для изготовления постоянных магнитов, были сосредоточены на сплавах, содержащих 15 и более масс. % кобальта. Такие

материалы в настоящее время хорошо исследованы, находят практическое применение и выпускаются в достаточно больших объемах.

Сплавы с меньшим содержанием кобальта изучены значительно слабее, в силу того, что время термической обработки для получения оптимальных магнитных свойств существенно выше чем у высококобальтовых сплавов. Это по мнению исследователей делало их неконкурентоспособными для промышленного использования. Между тем, сплавы с содержанием кобальта 8 – 13 масс. % обладают и целым рядом преимуществ. В первую очередь это высокая пластичность и замедленная кинетика фазовых превращений, позволяющая существенно улучшить воспроизводимость магнитных и механических характеристик.

В этой связи разработка и исследования низкокобальтовых магнитотвердых Fe-Cr-Co сплавов с высоким уровнем магнитных и механических характеристик является актуальной научной задачей.

Представленная диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов формирования структуры и магнитных свойств сплавов системы Fe-Cr-Co с пониженным содержанием кобальта, полученных методами порошковой металлургии. В работе детально исследованы взаимосвязь тонкой кристаллической структуры и магнитных свойств низкокобальтовых сплавов с содержанием хрома 21-31 и кобальта 7 – 13 масс. % соответственно легированных молибденом и кремнием, разработаны эффективные режимы термической обработки для получения постоянных магнитов с высоким уровнем магнитных характеристик. Методом математического планирования эксперимента построены поверхности отклика и получены зависимости основных магнитных характеристик от температуры термомагнитной обработки (ТМО) и критической скорости охлаждения в магнитном поле, а также от содержания в сплаве хрома, кобальта и молибдена для низкокобальтовых Fe-Cr-Co сплавов. Разработаны новые экономнолегированные сплавы со значениями магнитных характеристик сравнимых с промышленными марками сплавов с большим содержанием кобальта.

В целом, проведенные исследования представляются важными и актуальными как в фундаментальном, так и в прикладном отношении.

### **Содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы, из 105 наименований и приложения. Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, включая 74 иллюстрации, 61 таблицу и 38 формул.

Во введении изложена актуальность проведенного исследования, сформулированы цели и задачи работы, методология и методы исследования, научная новизна, практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, апробация работы, а также личный вклад автора.

**Первая глава** посвящена литературному обзору, в котором весьма подробно анализируются исследования, посвященные магнитотвердым сплавам на основе системы Fe-Cr-Co. Значительное место в литературном обзоре уделено диаграммам состояния тройной системы Fe-Cr-Co, рассмотрены вопросы формирования структуры сплавов этой системы при спинодальном распаде, а также влиянию различных легирующих элементов на процесс формирования структуры. Важное место в литературном обзоре уделено также вопросам формирования высококоэрцитивного состояния, возникающего в результате спинодального распада в сплавах системы Fe-Cr-Co. В заключении литературного обзора сформулирована задача исследования.

**Вторая глава** посвящена методическим вопросам. Здесь обосновывается выбор сплавов для исследования и приводится их химический состав, а также описана технология приготовления образцов сплавов методами порошковой металлургии и методы термической и термомагнитной обработки. В качестве объектов исследования были выбраны экономнолегируемые магнитотвердые сплавы системы Fe-Cr-Co с содержанием хрома -25 – 31, кобальта – 7 – 13 и молибдена 0,5 – 4 масс. % соответственно. Значительное место посвящено описанию экспериментальных методов исследования структуры, состава, магнитных и механических свойств образцов исследованных сплавов.

**Третья глава** посвящена изучению фазовых превращений в выбранных для исследования сплавах, влиянию различных режимов термической и термомагнитной обработки на магнитные характеристики сплавов, исследованию особенностей формирования структуры в высококоэрцитивном состоянии, определению механических свойств.

Так, в частности, dilatометрическим методом были определены температуры начала спинодального распада в сплавах, содержащих 7 и 13 масс. % кобальта, методами рентгеноструктурного анализа и измерения твердости – фазовое состояние сплавов в интервале температур 500 - 1300С.

Большое внимание было уделено исследованию процессов образования немагнитной  $\sigma$  – фазы, наличие которой в структуре сплава существенно ухудшает его магнитные и механические свойства. Кинетика выделения  $\sigma$  – фазы изучалась на сплавах с большим содержанием хрома (33 масс. %) и кобальта (12 масс. %) методами рентгеноструктурного анализа и измерения твердости. Были установлены температурные интервалы и скорость выделения этой фазы.

Полученные данные о температурных интервалах фазовых превращений были использованы при выборе режимов термической и термомагнитной обработок.

Для выбора оптимальных режимов термических обработок использовался метод математического планирования эксперимента. Была построена матрица планирования для двухфакторной задачи, при этом факторами являлись температура начала ТМО и скорость охлаждения сплава в магнитном поле. Были получены уравнения регрессий в виде зависимости основных магнитных гистерезисных свойств от факторов термической обработки для сплавов от 7 до 13 масс. % кобальта.

Значимость коэффициентов уравнений регрессий определялась по стандартизованным диаграммам Парето с уровнем значимости меньше 0,05. Для оценки адекватности уравнений регрессий был использован коэффициент детерминации, показывающей какая доля дисперсии результативного признака объясняется влиянием независимых переменных.

Были построены поверхности отклика и их поперечные сечения, по которым были определены оптимальные режимы термической обработки для сплавов с различным содержанием кобальта. Так, для сплава с содержанием кобальта 13 масс. % (28X13K2MC) оптимальным режимом ТМО для получения максимальных значений коэрцитивной силы и максимальной магнитной энергии является охлаждение сплава в магнитном поле от температур 670 – 690°С до температуры 600°С со скоростью 80 - 100°С /час.

Исследование структуры сплавов в высококоэрцитивном состоянии проводили методами рентгеноструктурного, нейтронного и электронномикроскопического анализа. Было показано, что наблюдаемая структура является следствием спинодального распада высокотемпературной  $\alpha$  – фазы на две изоморфные  $\alpha_1$   $\alpha_2$  – фазы, отличающиеся по составу.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию магнитных свойств низкокобальтовых Fe-Cr-Co сплавов различных составов.

Использованный в работе метод математического планирования эксперимента показал свою высокую эффективность, так как экспериментальные и рассчитанные по регрессиям значения магнитных характеристик сплавов системы Fe-Cr-Co с различным содержанием кобальта отличаются всего на несколько процентов.

При сравнении магнитных свойств, исследованных низкокобальтовых магнитотвердых сплавов со свойствами материалов с большим содержанием кобальта было установлено, что исследованные сплавы с 8 масс. % кобальта (26X8KMC, 26X83MC, 30X8KMC и 30X8K3MC) и сплавы с 10 -13 масс. % кобальта (28X10K4MC, 26X12KMC и 28X13K2MC) не уступают промышленным сплавам типа 52КФ и 25X15К, соответственно.

В диссертационной работе получен ряд следующих **наиболее существенных** результатов:

- для магнитотвердых низкокобальтовых сплавов с 8 масс. % кобальта получены следующие значения магнитных характеристик: остаточная индукция – 1,3 Тл; коэрцитивная сила – 45, 0 кА/м; максимальная магнитная энергия – 34,1 кДж/м<sup>3</sup>, а для сплавов с 10 – 13 масс. % кобальта значения этих параметров составляют соответственно 1,34 Тл; 44,5 кА/м; 35,7 кДж/м<sup>3</sup>, что сравнимо со свойствами промышленных сплавов с большим содержанием кобальта.

- методом регрессионного анализа построены поверхности отклика и получены аналитические зависимости магнитных свойств от температуры термомагнитной обработки и критической скорости охлаждения сплавов, позволившие оптимизировать режимы термических обработок.

- получены аналитические зависимости остаточной индукции, коэрцитивной силы и максимальной магнитной энергии от содержания в сплаве хрома, кобальта и молибдена, позволившие оценить вклад каждого из этих элементов в величину указанных магнитных параметров.

Вышеперечисленные результаты являются оригинальными и удовлетворяют требованиям новизны, предъявляемым к диссертационной работе.

**Теоретическая и практическая значимости** результатов представленной работы заключаются в следующем:

- предложена адекватная математическая модель, позволяющая на основе регрессионных соотношений определять оптимальные режимы термической обработки и влияние легирующих элементов на магнитные гистерезисные характеристики экономно легированных магнитотвердых сплавов системы Fe-Cr-Co; определенные по этой модели значения магнитных параметров находятся в хорошем согласии с экспериментальными значениями;

- результаты настоящей работы могут быть использованы для совершенствования существующих и разработки новых экономнолегированных магнитотвердых сплавов на основе системы Fe-Cr-Co.

Следовательно, автор диссертационной работы выносит на защиту результаты комплексного исследования влияния различных термических обработок и состава на магнитные свойства низкокобальтовых магнитотвердых сплавов системы Fe-Cr-Co, полученных методом порошковой металлургии.

**Достоверность научных результатов** диссертационной работы обеспечивается проведением комплексных исследований с использованием различных физических методик, а также применением современных алгоритмов математической обработки.

Результаты работы опубликованы в 33 научных публикациях, в том числе в 3 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также получен патент РФ № 2557852.

Диссертация изложена грамотно, построена логично. Приведенные в тексте диссертации таблицы, рисунки и графики зависимостей, достаточно полно иллюстрируют основные результаты.

#### **Замечания по диссертации**

1. Основным методом определения оптимальных составов и режимов термической обработки исследованных сплавов является метод математического планирования эксперимента. При всех достоинствах этого метода он является формальным и не связан с реальными физическими процессами, протекающими в сплавах при термических обработках. Использование этого метода выглядело бы более убедительным, если бы удалось установить связь коэффициентов в регрессиях с конкретными параметрами структуры сплавов.

2. В работе исследовались сплавы, полученные методом порошковой металлургии. Однако, хорошо известно, что сплавы системы Fe-Cr-Co отличаются от других сплавов со «средними» значениями магнитных характеристик возможностью получения магнитов методами пластической деформации. В этой связи было бы желательно сравнить эффективность использования порошковых методов и методов пластической деформации для получения оптимальных магнитных свойств.

3. Известно, что сплавы системы Fe-Cr-Co, содержащие 15 масс. % кобальта могут быть использованы как универсальные материалы для изготовления активных частей роторов СГД. Универсальность достигается за счет того, что варьированием режимов термической обработки можно получать широкий спектр значений коэрцитивной силы, что позволяет использовать один и тот же сплав в СГД с различными рабочими полями. Было бы желательно установить возможно ли такое регулирование в сплавах с меньшим содержанием кобальта, которые исследовались в настоящей работе.

Отмеченные недостатки не отражаются на основных выводах, сделанных в работе и не снижают, следовательно, общей высокой оценки представленной диссертации.

В автореферате и цитируемых статьях полностью отражено содержание работы. Изложенный в диссертации материал свидетельствует о высокой научной квалификации Т. А. Вомпе, а диссертация является законченной квалификационной исследовательской работой, посвященной решению актуальной научной проблемы, имеющей фундаментальное и практическое значение.

По актуальности, достоверности, методическому уровню исследования, научной новизне и значимости полученных результатов диссертация соответствует п.9 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ и паспорта специальности 05.16.01- «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов». Автор работы - Т.А. Вомпе заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

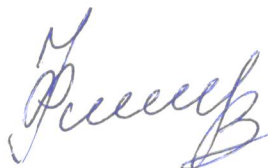
Диссертационная работа Т.А. Вомпе «Разработка и исследования низкокобальтовых магнитотвердых Fe-Cr-Co сплавов» заслушана и обсуждена на заседании научно-технического совета Института металловедения и физики металлов ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» « 07 » сентября 2018г. (протокол № 14 ).

Зам. председателя НТС ИМФМ, к.т.н.



А. И. Ковалев

Ученый секретарь НТС ИМФМ, к.ф.-м.н.



В.П. Филиппова