

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
**Вомпе Татьяны Алексеевны «Разработка и исследование
низкокобальтовых магнитотвёрдых Fe-Cr-Co сплавов»**, представленную
на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Актуальность темы. Постоянные магниты широко применяют в электронике, робототехнике, навигации, системах безопасности, авиа- и ракетостроении, в медицине, других отраслях промышленности. По различным оценкам объем производства материалов для постоянных магнитов к 2025 году достигнет 40-50 млрд. долларов США.

Сплавы системы Fe-Cr-Co часто рассматривают как сплавы, которые могут заменить сплавы системы Fe-Ni-Al-Co-Cu, т.к. обладают сравнимым уровнем эксплуатационных гистерезисных свойств. Кроме того сплавы на основе системы Fe-Cr-Co обладают высокой коррозионной стойкостью, высокой механической обрабатываемостью, более дешевы по сравнению со сплавами типа ЮНДК24, в первую очередь из-за более низкого содержания кобальта.

В основном большая часть работ посвящена сплавам с содержанием кобальта более 15 %. Вместе с тем недостаток и/или противоречивость данных о фазовом состоянии низкокобальтовых сплавов Fe-Cr-Co, оптимальных термических обработках, практически полное отсутствие работ по температурной стабильности их свойств, вызывает необходимость детального изучения этих материалов.

Необходимо отметить также, что в рассматриваемой диссертационной работе изучены низкокобальтовые сплавы, полученные методом порошковой металлургии, что позволяет повысить безотходность производства и снизить его трудоемкость.

Разработка низкокобальтовых магнитотвёрдых Fe-Cr-Co сплавов с высоким уровнем магнитных и механических свойств с использованием метода порошковой металлургии является актуальной научной задачей.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 155 страницах и состоит из введения, четырех глав,

библиографического списка из 105 наименований, содержит 74 рисунка, 61 таблицу и 38 формул.

Во введении кратко и емко:

- проанализированы актуальность и степень проработанности тематики диссертационной работы;
- сформулирована цель и задачи исследования, кратко перечислены использованные методы исследования;
- изложены научная новизна и практическая значимость диссертационной работы;
- сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит аналитический обзор литературы. В начале главы проведена общая оценка уровня магнитных свойств магнитотвердых сплавов различного типа и проанализировано развитие исследований материалов на основе системы Fe-Cr-Co. Затем проанализировано фазовое состояние сплавов системы Fe-Cr-Co, формирование высококоэрцитивного состояния в процессе термической обработки данных сплавов. Отдельно проанализировано влияние основных компонентов и легирующих элементов на фазовое состояние и свойства сплавов. В аналитическом обзоре литературы оценены механические свойства сплавов и их области применения. В заключении литературного обзора проведена постановка задачи исследования.

Необходимо отметить, что автор постарался использовать по максимуму современные источники, хотя работ посвященных сплавам Fe-Cr-Co в настоящее время не так много – из 90 источников литературного обзора 24 источника датированы позднее 2010 года.

Вторая глава содержит данные о химическом составе исследуемых материалов, способе производства образцов по порошковому методу, термической и термомагнитной обработке сплавов. Описаны методы исследования и оборудование, использованное при их реализации – рентгенофлуоресцентный анализ, дилатометрический анализ, рентгеноструктурный анализ, нейтронные дифракционные исследования, оптическая и электронная просвечивающая микроскопии, магнитометрия и измерения механических свойств (твердость и испытание на сжатие). Так же очень кратко описаны методы анализа данных.

Третья глава содержит экспериментальные данные и их обсуждение, полученные в процессе разработки и исследовании полученных низкокобальтовых сплавов Fe-Cr-Co. Первый подраздел посвящен исследованию фазового состояния изучаемых сплавов в температурном диапазоне до 1250 °С с целью установления границ фазовых областей для выбора температур термической и термомагнитной обработок. Во втором подразделе изучена кинетика выделения σ -фазы, которая в сплавах Fe-Cr-Co оказывает сильное влияние на магнитные и механические свойства. Основная по объему часть экспериментальной главы (подраздел 3.3) посвящена выбору режима термической обработки изученных сплавов. Обосновано использован метод планирования эксперимента для решения задачи оптимизации параметров термической обработки для получения высоких магнитных свойств изученных сплавов. В качестве варьируемых параметров использованы температура начала охлаждения в магнитном поле и скорость этого охлаждения.

Отметим, что *несомненным достоинством работы* является грамотное использование статистических программных продуктов, что позволило автору провести на высоком уровне регрессионный и дисперсионный анализ при определении коэффициентов регрессий и их значимости, также подготовить удобный и практичный иллюстративный материал.

После оптимизации основной обработки автор изучал влияние дополнительной обработки – низкотемпературного отжига в диапазоне 500-420 °С - на уровень магнитных свойств разработанных сплавов. Данная задача решалась с целью повышения магнитных свойств. Показано, что проведение дополнительного низкотемпературного отжига повышает коэрцитивную силу и максимальное энергетическое произведение в 1,3 и 1,5 раз, соответственно. Отметим, что автор с авторским коллективом получил по данному вопросу патент на способ термической обработки.

Далее автор изучал микроструктуру и фазовое состояние сплавов после распада высокотемпературного α -твердого раствора. Однако применение рентгеноструктурного анализа и нейтронной дифракции не позволило автору доказать наличие двухфазного ($\alpha_1 + \alpha_2$)-состояния, которое наблюдается по данным электронной микроскопии.

К достоинствам работы хотелось бы отнести наличие данных об уровне механических свойств разработанных сплавов, исследование которых описано в последнем подразделе главы 3. Значительный интерес представляют выводы к главе 3, в которых диссертант сопоставляет уровень гистерезисных магнитных свойств промышленно выпускаемых сплавов и разработанных в данной работе.

В четвертой главе обобщены данные о влиянии химического состава – содержания хрома, кобальта и молибдена – на уровень магнитных свойств. Решение данной задачи важно для разработки других низкокобальтовых сплавов.

Научная новизна. К наиболее важным научным результатам исследования, характеризующим его новизну, могут быть отнесены:

- впервые получены регрессионные модели зависимостей магнитных свойств от параметров термомагнитной обработки для магнитотвёрдых Fe-Cr-Co сплавов с массовой долей кобальта от 7 до 13 %, а также регрессионные модели влияния химического состава на уровень магнитных свойств;

- установление факта, что формирование высококоэрцитивного состояния (ВКС) в низкокобальтовых сплавах продолжается в температурном интервале до 420 °С, тогда как по литературным данным в сплавах с 12 %Co и выше формирование ВКС продолжается только до температуры около 500 °С.

- разработан способ термической обработки магнитотвёрдых сплавов системы железо-хром-кобальт с массовой долей кобальта 8 %, позволяющий повышать значения магнитных гистерезисных свойств за счет проведения дополнительного низкотемпературного отпуска в температурном интервале 500-420 °С.

Степень обоснованности и достоверности результатов и выводов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается грамотностью постановки решаемых задач, использовании современных методов исследований, проведением измерений на сертифицированном оборудовании, большим объемом экспериментальных данных и грамотным использованием методов статистической обработки результатов и современных программных пакетов статистической обработки. Результаты

работы апробированы и опубликованы в реферируемых журналах, а также представлены на российских и международных конференциях.

Практическая ценность полученных результатов. Разработаны новые низкокобальтовые магнитотвёрдые сплавы на основе системы Fe-Cr-Co с массовой долей хрома 25 – 31 %, кобальта 7 – 13 %, молибдена 0,5 – 4 % и кремния 0,5 %. Проведена оптимизация термической обработки разработанных сплавов для обеспечения высокого уровня магнитных свойств: остаточная индукция B_r до 1,35 Тл, коэрцитивная сила H_c до 45,0 кА/м, максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max} -35,7$ кДж/м³.

Показано, что разработанные сплавы с 8 %Co могут быть использованы вместо промышленно выпускаемых сплавов с 10 %Co, а разработанные сплавы с 10-13 % кобальта могут заменить промышленно выпускаемый сплав с 15 % кобальта.

Получен патент РФ № 2557852 на «Способ термической обработки магнитотвёрдых сплавов системы железо-хром-кобальт с содержанием кобальта 8 вес. %», позволяющий повышать значения магнитных гистерезисных свойств.

В работе получены регрессионные модели влияния химического состава сплава на уровень гистерезисных магнитных свойства. Данные модели могут быть рекомендованы для использования при разработке новых низкокобальтовых сплавов.

Полученные в работе результаты могут быть использованы на предприятиях по производству постоянных магнитов (АО «Спецмагнит», ОАО НПО «Магнетон» и др.), в том числе при оптимизации параметров технологического процесса изготовления магнитов.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Диссертационная работа содержит стилистические неточности и заимствованные ошибки:
 - ошибочно кобальт отнесен к редкоземельным элементам на странице 12. Вероятно, это связано с неточностью перевода из иностранного источника;
 - заимствованный иллюстративный материал не всегда содержит ссылки на первоисточники (например, рисунок 2 на страницах 13-15, рисунок 5 на странице 18), что затрудняет восприятие работы;

- модельный сплав 33Х12К2Д, использованный для изучения кинетики выделения σ -фазы в подразделе 3.2, не описан в подразделе 2.1 (выбор сплавов для исследования). Диссертационная работа не содержит сведений о его точном химическом составе;

- автор при описании рисунков 22, 25, 28, 31, 34, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 67 использует как название «петля гистерезиса», а на самом деле на рисунках изображены кривые намагничивания и только часть петли гистерезиса – её «спинка»;

- считаю не вполне неудачным название главы 4 «Влияние легирующих компонентов...». В данной главе рассмотрено влияние основных компонентов – хрома и кобальта – на магнитные свойства разработанных сплавов. И даже молибден в данной работе нельзя однозначно отнести к легирующим элементам, так как он присутствует во всех сплавах и безмолибденовые сплавы в работе не рассматриваются.

2. В диссертационной работе не указаны погрешности (неопределенности) метода определения химического состава сплавов.

3. В главе 2 при описании методики дилатометрического анализа не обоснован выбор скорости эксперимента при определении интервала спинодального распада - 10 град/мин. Причем автор сама указывает на странице 40, что данная скорость высока.

4. При описании дилатометрического метода в главе 2 указана предельная температура нагрева 1300 °С, однако все экспериментальные данные, приведенные в главе 3, содержат эксперименты при нагреве только до 1000 °С с последующим охлаждением, причем на странице 43 указано, что сплавы находятся при температуре 1000 °С в двухфазном ($\alpha+\gamma$)-состоянии. Возникает вопрос, а были ли при дилатометрическом анализе при охлаждении образцы в однофазном состоянии.

Отмеченные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы Вомпе Т.А. и не снижают её научной и практической значимости.

Диссертационная работа Вомпе Т.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена важная задачи металловедения – разработка новых низкокобальтовых магнитотвёрдых Fe-Cr-Co сплавов с

заданным уровнем физических, механических и эксплуатационных свойств. Считаю, что диссертационная работа Вомпе Т.А. «Разработка и исследование низкокобальтовых магнитотвёрдых Fe-Cr-Co сплавов» отвечает всем требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Вомпе Татьяна Алексеевна заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Доцент по кафедре, доцент кафедры
физического материаловедения
Национального исследовательского
технологического университета
«МИСиС»,
кандидат физико-математических наук,



Перминов Александр Сергеевич

Дата: 12.09.2018г.

Адрес: 119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»
Тел.: 8 (495) 638-46-38
E-mail: perminas@mail.ru

ПОДПИСЬ _____ ЗАВЕРЯЮ _____
Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ «МИСиС» _____ И. Исаев

