

Министерство промышленности и торговли
Российской Федерации

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:

Первый заместитель Генерального директора

ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им.

И.П.Бардина»,
кандидат технических наук



Углов В.А.

2020 г.

« 02 » 03 2020 год № 545-2/10
на № от

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Устюхина Алексея Сергеевича «Синтез и исследование свойств порошковых магнитотвёрдых сплавов системы Fe-Cr-Co», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Актуальность темы

Магнитотвердые материалы широко применяются в различных отраслях промышленности: электротехнике, машиностроении, авиа-космической техники, медицине, компьютерной технике, в системах управления, навигации и безопасности и т.д. Объемы производства данных материалов постоянно растут. В настоящее время основными материалами для изготовления постоянных магнитов являются сплавы, содержащие редкоземельные металлы (РЗМ), такие как системы Nd-Fe-B и Sm-Co. Эти материалы обладают очень высокими магнитными свойствами, а технология их производства, основанная на методах порошковой металлургии, позволяет изготавливать магниты различной формы и размеров. Тем не менее, использование этих сплавов сдерживается высокой стоимостью РЗМ, низкой коррозионной стойкостью, склонностью к охрупчиванию и сложностью технологии их изготовления.

Во многих областях применения магнитотвердых сплавов нет необходимости изготавливать магниты с экстремальными свойствами, а требуются постоянные магниты с определенным сочетанием «средних» магнитных свойств и высокой пластичности. К таким материалам относятся сплавы на основе системы Fe-Cr-Co. Эти сплавы обладают уникальным для магнитотвердых материалов сочетанием магнитных и механических

свойств. 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 широкое практическое применение и выпускаются в достаточно больших объемах.

Порошковая металлургия в качестве технологии получения сплавов системы Fe-Cr-Co на настоящий момент применяется редко. В то же время производство постоянных магнитов в большинстве случаев мелкосерийное с разнообразным спектром форм и размеров, что делает порошковую металлургию значительно более выгодной технологией с экономической точки зрения по сравнению с технологией плавки и литья. Поэтому использование в диссертационной работе технологии порошковой металлургии в качестве способа получения Fe-Cr-Co сплавов уже определяет её актуальность.

В представленной диссертационной работе исследованы магнитные свойства Fe-Cr-Co сплавов с содержанием хрома - 26 и кобальта - 16 масс. %, соответственно, легированных молибденом и вольфрамом, полученных методами порошковой металлургии при различных температурных условиях спекания. В работе разработаны эффективные режимы спекания и термической обработки для получения постоянных магнитов с высоким уровнем магнитных характеристик, в том числе и для низкотемпературных режимов спекания (температура спекания 1200 °C), что снижает износ оборудования. Исследованы малоизученные аспекты процессов диффузии и испарения хрома для системы Fe-Cr-Co в ходе вакуумного спекания. Разработана математическая модель для построения концентрационных профилей и исследования процессов диффузии и испарения хрома при спекании, описывающихся экспоненциальным законом Аррениуса и законом Ленгмюра, соответственно. Предложен способ получения Fe-Cr-Co сплавов на основе технологии порошковой металлургии с добавлением стадии горячей прокатки после низкотемпературного спекания для получения высокоплотных образцов с уровнем магнитных свойств, сравнимых с промышленными марками Fe-Cr-Co сплавов.

Проведенные исследования в диссертационной работе представляются важными и актуальными как в фундаментальном, так и в прикладном отношении.

Научная новизна

Среди полученных в работе научных результатов следует отметить:

- проведены исследования испарения хрома при спекании порошкового сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W в вакууме. Экспериментальные зависимости распределения концентрации хрома на поверхности и в объеме образца при спекании сплавов Fe-Cr-Co качественно совпадают с теоретическими результатами, полученными по предложенной математической модели для описания нестационарного процесса диффузии и испарения хрома с открытой поверхности. Показано, что наибольшая скорость испарения хрома

реализуется на первых минутах спекания. Экспериментально измерена толщина обедненного хромом слоя, равная 0,5 мм.

- в результате проведенных экспериментальных исследований показано, что при повышении температуры спекания сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W от 1330 до 1420 °C испарение хрома приводит к снижению коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r – на 5 – 10 %, максимального энергетического произведения $BH_{(max)}$ – на 10 – 15 %.

- предложен новый способ изготовления высокоплотных магнитотвердых порошковых Fe-Cr-Co сплавов со средним содержанием кобальта, заключающийся в спекании при пониженной температуре (1200 °C) и последующей горячей прокатки. Относительная плотность материала после прокатки 97 – 98 %, что сопоставимо с плотностью Fe-Cr-Co сплавов, спеченных при высоких температурах (около 1400 °C).

- экспериментально установлено, что формирование γ -фазы в порошковых магнитотвердых сплавах системы Fe-Cr-Co при спекании приводит к увеличению остаточной пористости и возникновению химической неоднородности в системе.

В диссертационной работе получен ряд следующих наиболее существенных результатов:

- Для исследованного в диссертации порошкового магнитотвердого сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W наиболее высокие магнитные свойства были получены после спекания при температуре 1300 и 1330 °C: остаточная индукция $B_r = 1,1 – 1,16$ Тл, коэрцитивная сила $H_c = 56 – 59$ кА/м и максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max} = 30 – 33$ кДж/м³, что соответствуют уровню свойств литых аналогов системы Fe-Cr-Co, производящихся известными мировыми предприятиями. Важно отметить, что полученные магнитные свойства среднекобальтового сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W соответствуют характеристикам Fe-Cr-Co сплавов с высоким содержанием кобальта (более 20%), который является наиболее дорогим компонентом системы.

- Магнитные свойства порошкового сплава Fe-26Cr-16Co-2Mo-2W, спеченного в температурном интервале 1300 – 1360 °C, сохраняются на одном уровне при изменении скорости охлаждения в магнитном поле в ходе термомагнитной обработки в интервале 40 – 180 °C/ч, что обеспечивает удобство обработки данных порошковых заготовок на промышленном оборудовании.

- Разработана математическая модель, описывающая нестационарный процесс диффузии и испарения хрома с открытой поверхности цилиндрического образца сплавов системы Fe-Cr-Co в ходе спекания в вакууме. Установлено, что наибольшая скорость испарения хрома развивается на первых минутах спекания.

- Показано, что порошковые магнитотвердые материалы состава Fe-26Cr-16Co с плотностью 97 – 98 % можно получать при пониженной температуре спекания (1200 °C), если после спекания применять горячую прокатку. Указанные материалы имеют следующие магнитные свойства: остаточная индукция $B_r = 1,19 – 1,21$ Тл, коэрцитивная

сила $H_c = 42 - 52$ кА/м и максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max} = 29 - 31$ кДж/м³.

- Полученные экспериментальные результаты и опробованные режимы обработки были использованы при разработке способов получения сплавов системы Fe-Cr-Co методами порошковой металлургии с целью повышения эксплуатационных гистерезисных характеристик выпускаемой продукции на предприятии АО «Спецмагнит» (Акт об опробовании и внедрении научных результатов диссертационной работы Устюхина А.С.).

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов

В работе использованы современные методы материаловедения: оптическая и электронная микроскопия, рентгенография и др. Экспериментальные данные получены на сертифицированном оборудовании с использованием современных измерительных приборов. Проведенные в работе исследования и обработка результатов носят систематический характер, согласуются с опубликованными данными других авторов. Диссертация изложена грамотно, построена логично. Приведенные в тексте диссертации таблицы, рисунки и графики зависимостей достаточно полно иллюстрируют основные результаты.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы опубликованы в 24 научных публикациях, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ и 3 переводные статьи в журналах, индексируемых в системах SCOPUS и WOS.

Замечания по диссертации

1. Название главы 4 - «Испарение хрома в ходе спекания и его влияние на магнитные характеристики порошковых магнитов на основе Fe-Cr-Co» звучит некорректно, поскольку про магнитные свойства в этой главе не говорится. Про снижение магнитных свойств в результате испарения хрома упоминается в предыдущей главе 3.

2. В работе указано, что из-за испарения хрома при спекании в вакууме магнитные свойства Fe-Cr-Co сплавов снижаются. Возможно, в работе следовало бы также уделить внимание спеканию в инертной атмосфере, что позволило бы нивелировать процесс испарения.

3. В работе были исследованы Fe-Cr-Co сплавы, полученные методом порошковой металлургии, дана сравнительная характеристика магнитных свойств исследованных порошковых сплавов и литых аналогов. Однако известно, что магнитотвердые сплавы системы Fe-Cr-Co можно также получать методами пластической деформации. В связи с чем было бы желательно представить аналогичную сравнительную

характеристику свойств и эффективности применения методов порошковой металлургии и пластической деформации.

4. Автореферат, стр. 11. На рисунке 2 экспериментальные точки, характеризующие значения коэрцитивной силы при разных скоростях охлаждения в магнитном поле соединены линиями, однако это ничем не обосновано. Следовало бы оставить просто точки с указанием погрешности измерений или провести линию тренда между ними.

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 А.С. Устюхина, 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, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 и паспорта специальности 05.16.06 - «Порошковая металлургия и композиционные материалы». Автор работы - А.С. Устюхин заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 - «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Диссертационная работа А.С. Устюхина «Синтез и исследование свойств порошковых магнитотвёрдых сплавов системы Fe-Cr-Co» заслушана и обсуждена на совместном заседании научно-технического совета Научного центра прецизионных сплавов и специальных материалов и Научно-производственного центра порошковой металлургии ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» «27» февраля 2020г. (протокол № 2).

Председатель совместного НТС НПЦПМ и НЦПССМ,
кандидат технических наук

Секретарь НТС НПЦПМ и НЦПССМ

В.В. Соснин

Е.В. Пименов