

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
Гаврикова Ивана Сергеевича на тему
«Формирование высококоэрцитивного состояния в постоянных магнитах Fe-
Cr-Co, полученных методами селективного лазерного плавления и
инжекционного формования»
по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений

Сплавы системы Fe-Cr-Co относятся к так называемым прецизионным. Особенности физических процессов в результате которых удается получать магнитотвердый материал из этих сплавов в целом известны для метода литья. Развитие методов и подходов к изготовлению конструкционных материалов и, в первую очередь, аддитивных технологий, произошедшее за последние десятилетия, позволяют получать готовые изделия за одну-две операции. Однако в случае функциональных материалов, процедура их получения с заданным уровнем свойств представляется весьма сложной и нетривиальной задачей ввиду того, что известные подходы и режимы не могут быть воспроизведены в случае аддитивных технологий ввиду сильно неравновесных условий получения материала в последнем случае. По этой причине необходимы исследования влияния микроструктуры, получающейся методами инжекционного формования и селективного лазерного плавления на магнитные свойства материалов, поскольку известная микроструктура не может быть воспроизведена полностью.

Актуальность диссертационной работы Гаврикова И.С. обусловлена установлением механизмов формирования высококоэрцитивного состояния в магнитотвердых материалах на основе сплавов системы Fe-Cr-Co, изготовленных методами инжекционного формования и селективного лазерного плавления.

Высококоэрцитивное состояние в сплавах Fe-Cr-Co достигается в результате спинодального распада твердого раствора на две изоморфные фазы

при термомагнитной обработке в уже практически готовом образце материала. Задача первоначальных этапов получения материалов заключается как в создании нужной формы, так и получения заданной микроструктуры. При этом в процессе спинодального распада сплавов Fe-Cr-Co вклад в общую энергию реакции вносят магнитные поля, границы зерен и поля напряжения-деформации. Физические процессы, лежащие в основе этих реакций, еще не до конца понятны. В частности, исследованы влияние упругих деформаций от дислокации в мигрирующих границах зерен и влияние сильного магнитного поля. Увеличение последнего приводит к образованию очень тонких модулированных структур, за счет увеличения скорости реакции и, как следствие, к ухудшению магнитных характеристик. В то время как термообработка в отсутствие магнитного поля при увеличении ее длительности способна лишь в определенной степени усилить коэрцитивную силу. Другими словами, изготовление таких магнитотвердых материалов за счет различных условий протекания реакции спинодального распада определяет как магнитные, так и механические их свойства.

Приведенные результаты по влиянию внешних факторов на микроструктуру при изготовлении магнитотвердых материалов системы Fe-Cr-Co методами селективного лазерного плавления и инжекционного формования на всех этапах объяснены с использованием известных и широко применяемых моделей и подходов. Магнитные и механические свойства полученных образцов согласуются с приводимыми в научной и нормативной литературе.

Основные положения, выносимые на защиту, а также выводы и рекомендации, сделанные по главам, основаны на анализе полученных результатов в совокупности с данными литературных источников.

В работе получены новые научные результаты. Показана принципиальная возможность получения магнитотвердых материалов из сплавов Fe-Cr-Co методами инжекционного формования и селективного лазерного плавления. Установлены особенности формирования микроструктуры исследуемого сплава при селективном лазерном спекании. Показано влияние градиента температуры

на формирование микроструктуры и магнитных гистерезисных свойств в процессе селективного лазерного спекания.

Особенную ценность представляют полученные результаты и их обобщения с точки зрения практического применения. В диссертационной работе описан и проделан весь цикл производства изделий из магнитотвердых материалов в лабораторных условиях. Фактически это единственная работа, в которой выполнен весь цикл и получены образцы с механическими и магнитными свойствами, превосходящими таковые образцов, получаемых по традиционной технологии.

Все представленные результаты достигнуты в процессе выполнения научно-исследовательских работ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» ПНИ-ЭР «Разработка высокоэффективных технологий производства наноструктурированных постоянных магнитов на основе сплава системы Fe-Cr-Co со сниженным содержанием кобальта методами порошковой металлургии и МИМ-технологий» и ПНИ-ЭР «Разработка технологий производства постоянных магнитов на основе сплавов систем Fe-Cr-Co и Al-Ni-Cu-Co-Fe методами селективного лазерного сплавления». Результаты исследований могут быть востребованы в курсах лекций по магнитным материалам в российских университетах.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе экспериментальных данных и выводов основывается на физическом обосновании проведенных экспериментов, использовании современного аналитического оборудования, сопоставлении результатов исследования с результатами, полученными другими авторами в выбранной области исследований.

Структура диссертационной работы включает в себя введение, четыре главы, основные выводы и список использованной литературы, состоящий из 105 источников. Материал изложен на 124 страницах, включает 10 таблиц, 79 рисунков и схем.

Во **введении** обоснованы актуальность и целесообразность изучения условий формирования высококоэрцитивного состояния в магнитотвердых материалах на основе сплавов системы Fe-Cr-Co, изготовленных методами инъекционного формования и селективного лазерного плавления. Сформулированы цель и задачи работы, а также выносимые на защиту положения.

В **первой** главе представлен актуальный анализ научной литературы по широко используемым высокопрочным магнитотвердым материалам для изготовления постоянных деформируемых магнитов, среди которых выделены сплавы системы Fe-Cr-Co.

Вторая глава посвящена методике проведения эксперимента. Представлено описание используемых в работе материалов, оборудования, методов получения образцов и методик исследования химического состава, микроструктуры, механических и магнитных свойств. Приведено описание методов синтеза исходного сырья и материала.

В **третьей** главе рассмотрено и проанализировано влияние параметров процессов синтеза порошков сплавов Fe-Cr-Co на гранулометрический состав при газовой атомизации в инертной атмосфере и центробежном распылении с использованием плазмы. Представлены результаты исследований влияния свойств гранулята для ранее полученного порошкового материала на получающийся композит, а также исследованы способы и параметры процесса удаления связки из «зеленых» заготовок и спекания «коричневых» заготовок. Представлены результаты исследования и анализ влияния микроструктуры на магнитные свойства образцов, полученных методом инъекционного формования. Описаны результаты механических испытаний образцов, полученных методом инъекционного формования.

Четвертая глава включает описание исследований и анализ полученных результатов, посвященных принципиальной применимости метода селективного лазерного плавления при изготовлении образцов магнитотвердых материалов системы Fe-Cr-Co. Представлены результаты моделирования процесса 3D-печати в программном пакете Comsol Multiphysics. Приведены результаты

исследований влияния детерминированных параметров существенно неравновесного процесса селективного лазерного плавления на микроструктуру получаемых образцов. Сопоставлены результаты, предсказываемые модельными расчетами с полученными экспериментальными результатами. Представлены результаты исследований влияния режимов получения на магнитные свойства образцов, изготовленных методом селективного лазерного плавления. Приведены результаты механических испытаний образцов, изготовленных методом селективного лазерного плавления.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 4 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных, приравниваемых к журналам перечня ВАК, и 4 статьи в других рецензируемых изданиях.

Вопросы и замечания по содержанию работы

1. Из текста работы непонятно, каким образом учитывался тот факт, что при первом проходе лазерного луча по поверхности порошка свойства поверхности и тепловой контакт между частицами значительно отличается от такового при втором и последующих проходах.
2. При описании измерительного оборудования автор пишет о доверительных границах относительной погрешности измерений магнитной индукции, намагниченности и коэрцитивной силы гистерезисграфом МН-50, не превышающих $\pm 1\%$. В соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений мощности магнитных потерь магнитомягких материалов и магнитных характеристик магнитотвердых материалов, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от «29» декабря 2018 г. № 2816, погрешность рабочего эталона 1-го разряда – стандартных образцов магнитных характеристик магнитотвердых материалов по коэрцитивной силе по индукции, коэрцитивной силе по намагниченности и максимальному энергетическому произведению не может быть меньше 1%. Соответственно, передача единиц при калибровке и/или поверке средства измерений приведет к увеличению погрешности последнего по сравнению с погрешностью эталона.

3. На рисунках 74 а и б отмечены доверительные границы относительной погрешности измерений остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы по индукции от «мощности печати», составляющие около 5 %. Каким образом получена эта оценка, если относительная погрешность средства измерений не превышает 1 %?
4. Может ли автор дать рекомендации по «подгонке» установленных параметров процессов при применении сплавов других составов?
5. Автору следовало бы более подробно описать результаты экспериментальных исследований и моделирования.
6. Работа не свободна от лексических, фразеологических и грамматических ошибок и неточностей. Так, например, на странице 21 встречается словосочетание «удобоваримый размер»; на странице 31 – «аналогового гранулята», на странице 40 – «концентрированный инфракрасный луч нагрева», на странице 109 – «мощности печати», вместо термина максимальное энергетическое произведение используется «энергетическое произведение» и др.

Приведенные замечания не снижают общее положительное впечатление от диссертационной работы Гаврикова И.С. Сделанные замечания и имеющиеся технические неточности в оформлении не ставят под сомнения полученные в ней результаты и выводы. Работа выполнена на достаточном научном уровне, полученные результаты обладают научной новизной, а также имеют практическую значимость. Диссертация Гаврикова И.С. представляет законченную научно-исследовательскую работу. Диссертация написана четким и понятным языком. Все перечисленное выше позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели достигнуты, задачи исследования решены, а положения, выносимые на защиту, доказаны.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Гаврикова Ивана Сергеевича соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений по физико-математическим наукам по пункту 3 Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление

взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий и отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»

20 августа 2024 г.

А.С. Волегов

Адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Телефон: +7 (950) 638-40-82

e-mail: alexey.volegov@urfu.ru

Согласен на обработку персональных данных.

кандидат физико-
математических наук

Волегов Алексей Сергеевич