

На правах рукописи

ВЕРШИНИН Александр Вадимович

**СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МАГНИТОТВЁРДЫХ СПЛАВАХ
Fe-Cr-Co-W-Ga, ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ $\text{La}(\text{FeSiAl})_{13}$ И $\text{Ce}(\text{FeSi})_2$**

Специальность 01.04.11
Физика магнитных явлений

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург-2015 г.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН
Мушников Николай Варфоломеевич

Официальные оппоненты:

Овчинников Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией пучковых воздействий Института электрофизики УрО
РАН, г. Екатеринбург

Елсуков Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, заведующий
отделом физики и химии наноматериалов Физико-технического института УрО
РАН, г. Ижевск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,
г. Москва.

Защита состоится 29 мая 2015 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного
совета Д 004.003.01 при ИФМ УрО РАН по адресу: 620990, г. Екатеринбург,
ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте
института www.impr.uran.ru.

Автореферат разослан «__» апреля 2015 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Чарикова Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные исследования в области магнитных материалов направлены не только на разработку новых металлов и сплавов, но и на улучшение различных свойств уже существующих композиций. Зачастую изменения в свойствах сплавов и соединений зависят от малых концентраций легирующих элементов. Одним из ярких примеров такого изменения свойств является система магнитотвердых сплавов на основе Fe-Cr-Co, в которой требуемые магнитные характеристики и прочностные свойства достигаются за счёт введения небольшого количества (0.5 – 10 вес.%) легирующих элементов, таких как W и Ga. В интерметаллических соединениях типа LaFe₁₃ и CeFe₂ изменение магнитного состояния и физических свойств достигается путём введения малого (атомные проценты) количества элементов Si и Al. Ввиду столь небольшого количества легирующих добавок, для анализа структурных и магнитных изменений в вышеперечисленных системах необходим метод, чувствительный к локальным изменениям структуры. Эффект Мёссбауэра является мощным инструментом исследования структуры, вследствие его высокой чувствительности к эффектам ближнего порядка.

На сегодняшний день всё больше возникает необходимость в сплавах, обладающих высокими прочностными характеристиками, которые бы не уступали конструкционным сталям, и, в то же время, обладали магнитными свойствами, сравнимыми с магнитотвёрдыми материалами. Немаловажным фактором при производстве такого рода материалов является их стоимость, которая напрямую зависит от стоимости элементов, входящих в состав. Поэтому сплавы на основе системы Fe-Cr-Co являются перспективными материалами с точки зрения сочетания механических характеристик, магнитных свойств и относительно невысокой стоимости компонентов сплавов. Для удовлетворения требований по магнитным и прочностным характеристикам применяются различные термообработки и легирующие элементы, способствующие формированию оптимальной структуры. Получение информации о локальной атомной структуре сплава является необходимым условием для подбора оптимальных термообработок, легирующих элементов и оптимального базового состава сплава. Как показал опыт последних лет, развитие, как самой методики эксперимента, так и методов обработки

полученных спектров ядерного гамма резонанса (ЯГР) позволяет решать исследовательские задачи на высоком уровне и, как следствие, получать исчерпывающую информацию об изменениях в структуре сплава.

Ядерный гамма резонанс дает также возможность получения важной информации об изменении локального окружения магнитных атомов системы при фазовых переходах. По этой причине данный метод хорошо применим в исследовании фазовых переходов интерметаллических соединений на основе железа.

Интерметаллические соединения на основе железа $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ привлекают внимание исследователей в связи с наличием в них гигантского магнетокалорического эффекта, что даёт возможность использования данных соединений в качестве альтернативного хладагента в холодильных установках. Замена атома кремния на алюминий приводит к уменьшению магнетокалорического эффекта и появлению сложной концентрационной магнитной фазовой диаграммы, исследование которой представляет интерес с фундаментальной точки зрения. На сегодняшний день по существу остается не выясненной природа влияния примесных элементов на магнитное и структурное состояние этой важной для практики системы.

Среди интерметаллических соединений редкоземельных металлов с железом особое место занимают соединения $R\text{Fe}_2$ (R – редкоземельный элемент или иттрий) со структурой фазы Лавеса благодаря их уникальным свойствам, таким как «гигантская» магнитострикция, большой магнетокалорический эффект, высокая температура Кюри. Большой интерес исследователей к этим соединениям также обусловлен наличием в них структурных фазовых переходов и спиновой переориентации [1]. С другой стороны, интерметаллид CeFe_2 , входящий в эту группу, имеет относительно низкую, по сравнению с другими $R\text{Fe}_2$ соединениями, температуру магнитного упорядочения и невысокую намагниченность. Замена части Fe в этом соединении на другой элемент (Si) приводит к изменению кристаллической структуры и появлению антиферромагнитного упорядочения при низких температурах. Благодаря особенностям кристаллической и магнитной структуры система $\text{Ce}(\text{FeSi})_2$ является удобным объектом для исследования структурных и магнитных фазовых переходов. Стоит также отметить, что как в

системе $\text{La}(\text{FeSiAl})_{13}$ так и в $\text{Ce}(\text{FeSi})_2$ невыясненным остаётся влияние распределения атомов примеси в соединении на тип магнитного упорядочения.

Исследования по теме диссертации выполнены в лаборатории ферромагнитных сплавов Института физики металлов УрО РАН в Екатеринбурге.

Работа выполнена при поддержке: программы Президиума РАН "Фундаментальные основы исследований наноструктур и наноматериалов" (проект УрО РАН 12-П-23-2005), проекта УрО РАН 09-П-2-1035 "Влияние состава и локальной атомной структуры на функциональные свойства нанокристаллических ферромагнитных сплавов и технологические аспекты их получения", проекта РФФИ 10-02-96019 "Материалы на основе интерметаллических соединений для магнитных рефрижераторов", проекта РФФИ 12-02-00864 "Магнитные фазовые переходы в интерметаллических соединениях на основе Mn и Fe с конкурирующими обменными взаимодействиями", программы УрО РАН 12-Т-2-1012 "Индукцированные внешними воздействиями и спонтанные магнитные фазовые превращения в соединениях и сплавах на основе 3d переходных и редкоземельных металлов", научного проекта молодых ученых УрО РАН 13-2-НП-660 "Исследование магнитной и кристаллической структуры интерметаллического соединения $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ методом ядерного гамма резонанса".

Целью работы являлось установление связи структурных особенностей с магнитными и механическими свойствами ряда сплавов и интерметаллических соединений. Объектами исследования были выбраны сплавы состава (в мас. %): $\text{Cr}(10-22)\text{-Co}(10-22)\text{-W}(0-10)\text{-Ga}(0-4)\text{-Cu}(0-0.6)\text{-Al}(0-0.6)\text{-Fe}(\text{ост})$ и интерметаллические соединения: $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ с $0 \leq x \leq 0.12$ и $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ с $x = 0, 0.45, 0.05, 0.055, 0.06, 0.065, 0.07, 0.075$. Метод ядерного гамма резонанса выбран в качестве основного для исследования структурных особенностей представленных объектов исследования.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. На образцах сплавов на основе Fe-Cr-Co, легированных элементами W, Ga, Al и Cu и подвергнутых деформации и термообработке с целью достижения повышенных механических и магнитных свойств, провести исследование фазового состава и тонких особенностей структуры методом ЯГР и установить взаимосвязь

между структурными изменениями и магнитными и механическими характеристиками.

2. Для образцов интерметаллического соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ в концентрационном интервале $0 \leq x \leq 0.12$ провести температурные магнитные и структурные измерения и выяснить механизм магнитных фазовых переходов, а также оценить роль примесных атомов Si и Al в формировании магнитных свойств.

3. Синтезировать образцы интерметаллического соединения $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ с $x = 0, 0.45, 0.05, 0.055, 0.06, 0.065, 0.07, 0.075$. Провести измерения магнитной восприимчивости и определить температуры магнитных фазовых переходов. Выполнить температурное Мёссбауэровское исследование в диапазоне температур 100–300 К, и на основе анализа изменения сверхтонких параметров Мёссбауэровского спектра при фазовых переходах установить механизм изменения магнитного состояния при замещении железа атомами кремния.

В данной работе были получены и выносятся на защиту следующие **новые научные результаты**.

1. Установлено, что среди исследованных легирующих добавок максимальное положительное влияние на пластичность пятикомпонентного сплава на основе системы Fe-Co-Cr оказывает введение 0.5% Ga. В сплаве Fe-22Cr-15Co-9W-0.5Ga формируется оптимальная по фазовому составу структура.

2. Обнаружено, что в трёхкомпонентных сплавах Fe-10Cr-xGa, Fe-15Co-xGa, и Fe-22Co-xGa, $0.5 \leq x \leq 4$ (в мас. %) галлий в основном входит в твердые растворы базовых сплавов и препятствует их расслоению, т.е. делает твердые растворы более однородными.

3. Показано, что во время постдеформационного низкотемпературного отжига сплавов системы Fe-Cr-Co-W-Ga с пониженным содержанием хрома и кобальта, отличающихся повышенной намагниченностью и высокими прочностными свойствами, формируется структура, основными компонентами которой являются твердый раствор на основе α -Fe и обогащенная вольфрамом η' фаза. В такой структуре механизм формирования высококоэрцитивного состояния связан с задержкой смещения доменных границ на парамагнитных выделениях дисперсной фазы богатой вольфрамом.

4. Установлено, что в соединениях $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ $0 \leq x \leq 0.12$ присутствуют локальные области, характеризующиеся положительными и отрицательными квадрупольными сдвигами. Предложена модель формирования слоистой антиферромагнитной структуры в кубическом магнетике.

5. Обнаружено, что в соединениях $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ $0 \leq x \leq 0.12$ алюминий распределен статистически, в то время как кремний показывает тенденцию к локальному упорядочению.

6. Методом Эффекта Мёссбауэра подтверждено наличие в $\text{Ce}(\text{Fe}_{0.93}\text{Si}_{0.07})_2$ при низких температурах антиферромагнитной структуры, состоящей из двух структурно и магнитно неэквивалентных подрешеток железа с существенно различающимися величинами магнитных моментов.

7. Показано статистическое распределение атомов Si при замещении железа в соединении $\text{Ce}(\text{Fe}_{0.93}\text{Si}_{0.07})_2$.

Методологические основы исследования.

Поликристаллические образцы, изученные в настоящей работе, были получены методом плавки в индукционной и дуговой печах в атмосфере аргона. Кристаллическую структуру и фазовый состав всех образцов исследовали на дифрактометре ДРОН-6. Электронно-микроскопические исследования проводили с помощью трансмиссионного электронного микроскопа JEM-200 CX. Для проведения измерений методом эффекта Мёссбауэра использовали спектрометр MS 1101, исследования проводили с источником Co^{57} в матрице хрома. Магнитные гистерезисные характеристики измеряли на вибромагнитометре. Измерения кривых намагничивания и магнитной восприимчивости проводили с использованием SQUID-магнитометра MPMS-5. Измерения теплового расширения проводили с использованием тензометрического метода. Измерения теплоемкости проводили на низкотемпературном адиабатическом калориметре. Измерения механических свойств (временного сопротивления разрыву σ_b , условного предела текучести $\sigma_{0.2}$, относительного удлинения δ) проводили на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Предложена модель формирования слоистой антиферромагнитной структуры в кубическом магнетике.

Научная и практическая значимость работы

Данные, полученные в работе, вносят вклад в развитие существующих представлений о формировании высокопрочного и пластичного состояния в сплавах на основе системы Fe-Cr-Co и могут быть использованы при разработке и производстве высокопрочных пластичных магнитотвёрдых сплавов с заранее заданными свойствами. Полученные данные по магнитным фазовым переходам в системах интерметаллических соединений $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ и $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ могут быть использованы для разработки функциональных материалов для систем магнитного охлаждения.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Содержание диссертации соответствует формуле паспорта специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений: "область науки, занимающаяся изучением взаимодействий веществ и их структурных элементов..., обладающих магнитным моментом, между собой или с внешними магнитными полями; явлений, обусловленных этими взаимодействиями, а также разработкой материалов с заданными магнитными свойствами ..." и пункту 2: "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".

Личный вклад автора

Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке задач и выборе объектов исследования, принимал участие в приготовлении образцов. Интерметаллические соединения $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ были выплавлены автором, сплавы системы Fe-Cr-Co были выплавлены и обработаны совместно с Е.В. Белозеровым, интерметаллические соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ были получены совместно с А.А. Ермаковым. Измерения механических свойств образцов сплавов системы Fe-Cr-Co выполнены совместно с М.А. Уйминым. Автор совместно с руководителем проводил измерения теплового расширения и магнитных свойств образцов $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$. Измерения магнитных свойств и теплоемкости $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$

проводились автором совместно с Е.Г. Герасимовым и А.В. Прошкиным. Рентгеновская аттестация образцов проводилась в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН в Екатеринбурге (Россия) В.С. Гавико и Г.В. Ивановой. Все Мёссбауэровские исследования, вошедшие в диссертацию, проведены автором совместно с В.В. Сериковым и Н.М. Клейнерман. Обработка и расчёт Мёссбауэровских спектров выполнены автором с использованием программного пакета MTOOLS. Автор принимал непосредственное участие в обсуждении результатов работы, написании статей и тезисов докладов. Автором совместно с руководителем и соавторами предложена модель формирования слоистой антиферромагнитной структуры в кубическом магнетике.

Достоверность научных результатов обоснована использованием аттестованных образцов и экспериментального оборудования лаборатории ферромагнитных сплавов и центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН в Екатеринбурге (Россия). При повторных исследованиях отмечена воспроизводимость результатов исследования на разных образцах. Получено хорошее согласие экспериментальных результатов настоящей работы с литературными данными и более ранними исследованиями. Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов модельных и экспериментальных исследований и не противоречат современным научным представлениям.

Апробация работы. Научные результаты, полученные в настоящей работе, были представлены на ряде конференций: IV Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism”: Nanospintronics, (Екатеринбург, Россия, 2010); XI Всероссийская молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния “СПФКС-XI”, (Екатеринбург, Россия, 2010); Moscow International Symposium on Magnetism, (Москва, Россия, 2011); International Brokerage Event “ERA. NET-rus”, (Екатеринбург, Россия, 2011); XII международная конференция “Мёссбауэровская спектроскопия и её применение”, (Суздаль, Россия, 2012); 4th Russian-German Travelling Seminar on Physics and Chemistry of Nanomaterials and Synchrotron radiation “РСnano-2012”, (Эрланген, Германия, 2012); XIII Всероссийская молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния “СПФКС-XIII”, (Екатеринбург, Россия, 2012); International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect “ICAME-2013”, (Опатия, Хорватия, 2013); Moscow International

Symposium of Magnetism “MISM-2014”, (Москва, Россия, 2014); The conference Mössbauer Spectroscopy in Materials Science “MSMS-2014”, (Хлоховец, Чешская республика, 2014), XIII международная конференция “Мёссбауэровская спектроскопия и её применение”, (Суздаль, Россия, 2014).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 23 печатных работах: 11 статей в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, входящих в перечень ВАК, и 12 тезисов докладов.

Объём и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 172 страницы, включая 91 рисунок, 11 таблиц и список цитируемой литературы из 234 наименований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана научная новизна, изложены научная и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава содержит литературные данные о физических основах ядерного гамма-резонанса, о структуре и магнитных свойствах исследуемых сплавов и соединений, а также информацию о способах изменения магнитных и механических характеристик сплавов при различных интенсивных воздействиях. Приведено обоснование выбора объектов исследования.

Во второй главе диссертации описаны способы приготовления образцов и методики измерения их физических свойств, использованные в настоящей работе.

Сплавы состава (в мас. %): Cr(22-12)-Co(15-10)-W(10-8)-Ga(0.5-0)-Cu(0.6-0)-Al(0.6-0) для проведения работы были выплавлены в индукционной печи в атмосфере аргона. После гомогенизации при температуре 1200-1473°C в течение 2 часов слитки были прокованы в полосу при температуре 1100-1150°C. После закалки горячекатанного листа на α -твердый раствор от 1200-1473°C в воду сплавы подвергали холодной прокатке в лист с деформациями 40, 60, 70 или 80%, после чего проводилась многоступенчатая термообработка. Первую ступень обработки

проводили при температурах 600-670°C в течение 20-45 минут, вторую ступень при температуре 560-600°C в течение 30-60 минут.

Соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ были выплавлены в электродуговой печи в атмосфере аргона из исходных компонентов с последующей гомогенизацией при 900°C в вакууме в течение 14 суток. Соединения $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ были выплавлены в электродуговой печи в атмосфере аргона из исходных компонентов с последующей гомогенизацией при 860°C в течение 7 суток.

Кристаллическую структуру и фазовый состав всех образцов исследовали на дифрактометре ДРОН-6 в монохроматизированном Cr-K_α излучении (графитовый монохроматор). Температурные рентгеновские измерения выполнены в рентгеновской камере в вакууме в интервале температур 77–650 К. В области низких температур ($T < 293$ К) полученный порошок закрепляли на подложке с помощью смазки на основе окиси алюминия.

Микроструктуру тонких фольг и картины электронной дифракции образцов сплавов на основе системы Fe-Cr-Co исследовали с помощью трансмиссионного электронного микроскопа JEM-200 CX.

Для проведения измерений методом эффекта Мёссбауэра использовали спектрометр MS 1101. Исследования проводили с источником Co^{57} в матрице хрома. Низкотемпературные измерения проводили с использованием криостата в среде газообразного азота в интервале температур от 100 до 300 К. Измерения Мёссбауэровских спектров проводили как на фольгах (сплавы системы Fe-Cr-Co) так и на порошках (соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ и $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$). Обработка Мёссбауэровских спектров проводилась при помощи пакета программ Ms Tools, в который входят программы SPECTR и DISTRI [2].

Магнитные гистерезисные характеристики сплавов системы Fe-Cr-Co измеряли на вибромагнитометре в магнитном поле напряженностью до 1.6 МА/м (20 кЭ) после предварительного намагничивания образцов в импульсном поле напряженностью $H_m = 5.6$ МА/м (70 кЭ). Измерения проводили на пластинах, вырезанных из образцов, подвергнутых механическим испытаниям. Абсолютные значения намагниченности определяли с помощью эталонного никелевого образца.

Измерения кривых намагничивания и восприимчивости образцов $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ проводили с использованием SQUID-магнитометра MPMS-5 с

$H_m = 5.6$ МА/м в интервале температур $T = 4-400$ К. В качестве образцов применялись шарики, полученные с использованием шлифовки.

Измерения магнитной восприимчивости поликристаллических образцов $Ce(Fe_{1-x}Si_x)_2$ проводили в температурном интервале от 77 до 370 К в переменном синусоидальном магнитном поле 640 А/м с частотой $f = 74.5$ Гц.

Измерения теплового расширения образцов $La(Fe_{0.88}Si_xAl_{0.12-x})_{13}$ проводили с использованием тензометрического метода, основанного на зависимости электрического сопротивления наклеенных на поверхность образцов малобазных фольговых тензорезисторов WK-09-031CF-350 от геометрических размеров образцов.

Измерения теплоемкости соединений $Ce(Fe_{1-x}Si_x)_2$ проводили на низкотемпературном адиабатическом калориметре. Процесс измерения проходит в адиабатических условиях в автоматическом режиме. Возможный температурный интервал измерений составлял от 5 до 350 К.

Измерения механических свойств (временного сопротивления разрыву σ_b , условного предела текучести $\sigma_{0.2}$, относительного удлинения δ) сплавов (в мас. %): Cr(22-12)-Co(15-10)-W(10-8)-Ga(0.5-0)-Cu(0.6-0)-Al(0.6-0) проводили на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Образцы вырезали из холоднокатаного или прокатанного в «горячую» листа толщиной примерно 0.5 мм и с линейными размерами 50×10 мм.

Третья глава посвящена детальному исследованию структуры сплавов на основе системы Fe-Cr-Co и её связи с механическими и магнитными свойствами. В данной главе рассмотрено влияние состава сплава на структуру и свойства после различных обработок.

Как известно, тройные классические сплавы Fe-Cr-Co обладают модулированной структурой. Они проходят оптимальные обработки: закалку в воду, затем холодную пластическую деформацию с последующим низкотемпературным отжигом, в ходе которых формируется высококоэрцитивное состояние; однако при этом они являются твёрдыми и хрупкими. Для получения заданных механических свойств сплавы системы Fe-Cr-Co были легированными различными элементами. В работе [3] было показано, что добавка W приводит к

образованию новой фазы, которая повышает прочностные характеристики при сохранении хрупкости.

Проведённое нами исследование методом ЯГР сплавов с различными пластифицирующими добавками Ga, Cu, Al после каждой ступени оптимальной обработки показало, что однородный твёрдый раствор на основе ОЦК Fe не был получен ни после закалки, ни после деформации. Распределения сверхтонких параметров (рис. 1), восстановленные из Мёссбауэровских спектров образцов, прошедших последеформационное старение, показали присутствие трёх областей. 1) Область с высоким значением среднего сверхтонкого поля связана с α_1 – фазой, которая характеризуется пониженным содержанием хрома и увеличенным содержанием железа. 2) Область с низким значением среднего сверхтонкого поля связана с α_2 - фазой, которая обогащена хромом. 3) Парамагнитная область, которая представлена в виде дублета в спектрах, и из сопоставления с рентгеновскими данными может быть приписана η' фазе [3]. Анализ сверхтонких параметров, полученных из многоядерных функций распределения (рис. 1) показал, что максимальное содержание Fe в парамагнитных областях наблюдается в сплаве с Ga и Cu. В сплаве с алюминием α_1 и η' фазы содержат наименьшее количество Fe.

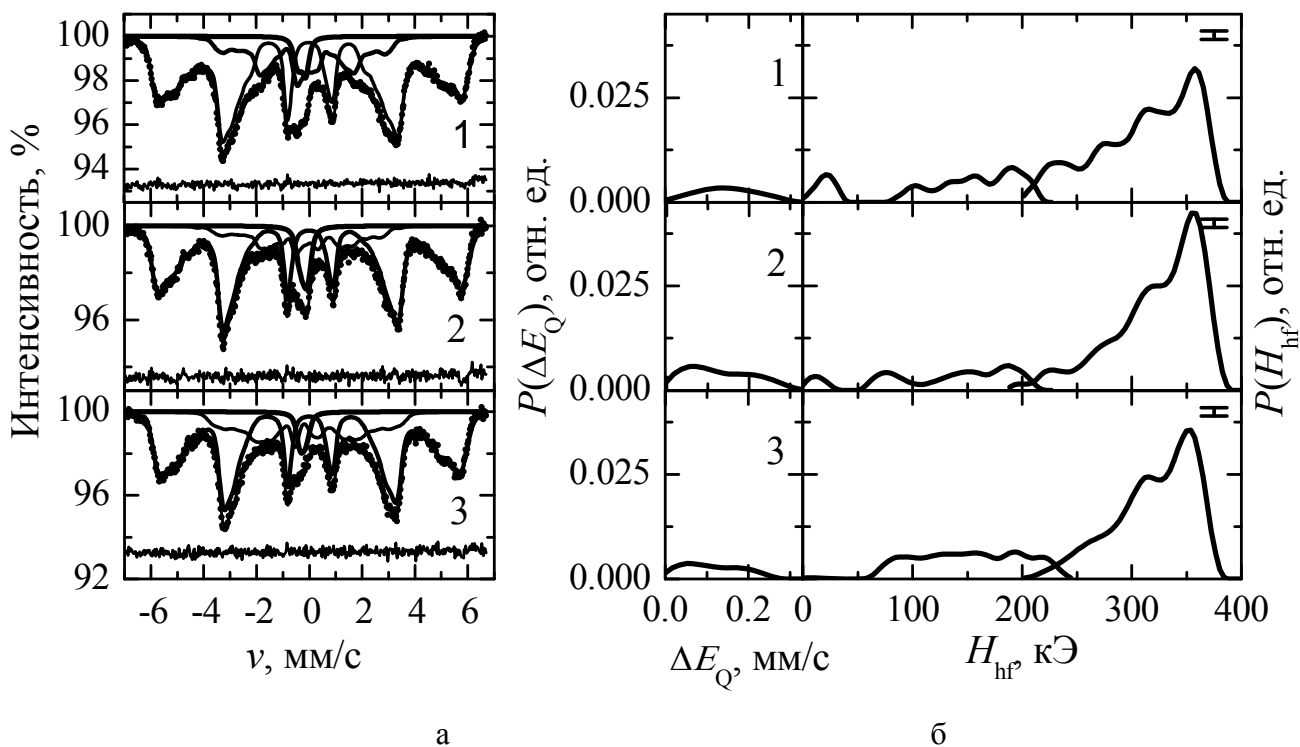


Рис. 1. Мёссбауэровские спектры с рассчитанными вкладами (а) и трёхъядерные распределения $P(H_{hf})$ и $P(\Delta E_Q)$ (б) для образцов, прошедших последеформационное старение: (1)-Fe-22Cr-15Co-W9-0.5Ga, (2)-Fe-22Cr-15Co-W9-0.6Cu, (3)-Fe-22Cr-15Co-W9-0.6Al.

Сравнение значений среднего сверхтонкого поля для магнитных фаз показывает, что наименее выраженные различия присущи сплавам с Ga. В этом сплаве различие в содержании Cr между α_1 и α_2 фазами меньше, чем в других сплавах. Это означает, что решетки этих фаз близки по величине, что, вероятно, приводит к уменьшению напряжения на границах фаз по сравнению с другими сплавами. По всей видимости, напряжения влияют на относительное удлинение этих сплавов. Значения величины квадрупольного расщепления парамагнитной фазы в сплаве с Ga максимально, что указывает на то, что в данном сплаве в парамагнитной фазе вольфрама содержится больше чем в парамагнитной фазе других сплавов. Стоит сказать, что сплав с Ga после оптимальных обработок имел максимальное значение относительного удлинения $\delta = 4.6\%$.

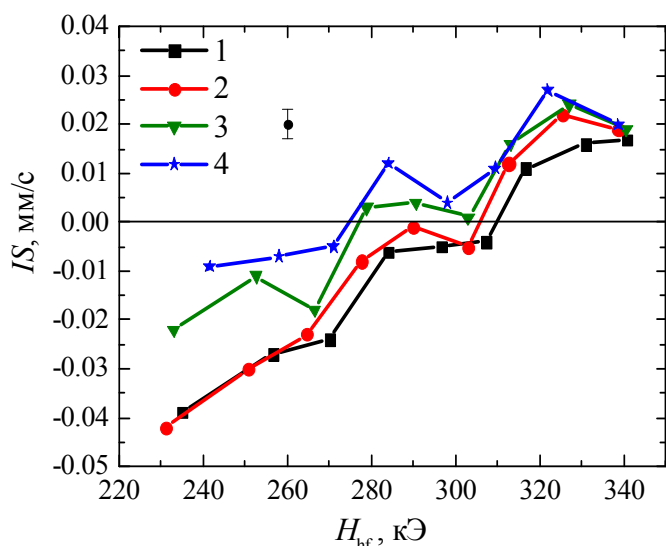


Рис. 2. Зависимость изомерного сдвига от сверхтонкого поля сплавов Fe -10Cr-xGa с $x = 0.5\%$ (1), 1% (2), 3% (3), 4% (4).

Мёссбауэровское исследование трёхкомпонентных сплавов (в мас. %) Fe -10Cr-(4 - 0.5)Ga, Fe-15Co-(4 - 0.5)Ga и Fe-22Co-(4 - 0.5)Ga позволило установить, что в Fe-Cr сплавах происходит растворение атомов галлия в твердом растворе. Анализ полученных значений сверхтонких параметров Мёссбауэровских спектров позволяет делать вывод о том, что галлий препятствует расслоению твердого раствора Fe-Cr. Судя по знаку и величине изомерного сдвига (IS), полученным из разложения

Мёссбауэровского спектра на подспектры, признаки присутствия даже малого содержания галлия обнаруживаются преимущественно в областях, обогащенных железом (рис. 2). С ростом концентрации галлия в Fe-Cr-Ga сплавах его распределение по объему становится более равномерным. В сплавах с кобальтом в малом количестве галлий не обнаруживается в структуре квазибинарных сплавов. Об этом свидетельствует практически полное совпадение значений интенсивностей спектральных вкладов сплава Fe-Co с 0.5% Ga и бинарного сплава без Ga (рис. 3).

При повышении концентрации Ga, судя по отсутствию признаков упорядочения, галлий повышает однородность твердого раствора. Кроме того, наблюдается тенденция к образованию областей, обогащенных этим элементом. Оба эти фактора – повышение однородности сплавов и образование дополнительных областей с параметром решетки меньшим, чем в сплавах с хромом, но большим чем в сплавах с кобальтом - могут оказывать положительное влияние на механические свойства многокомпонентных сплавов.

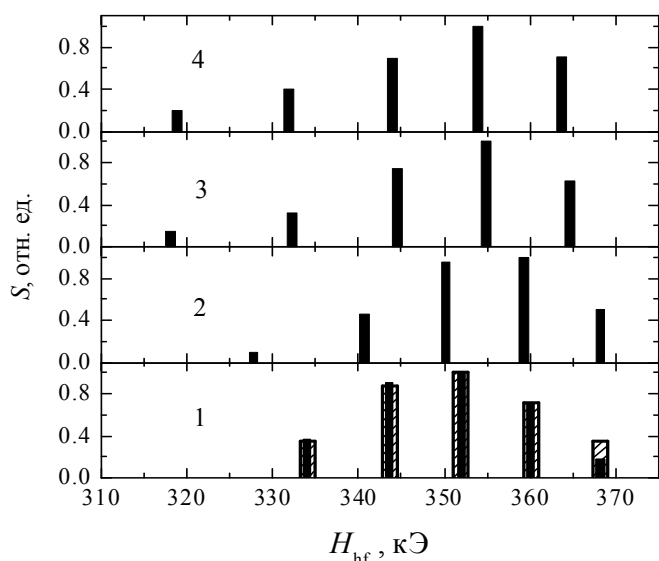


Рис. 3. Гистограммы спектральных вкладов для отдельных конфигураций ближайшего окружения атомов железа для сплавов Fe-15Co-xGa с $x = 0.5\%$ (1), 1% (2), 3% (3), 4% (4). Штриховыми колонками на рисунке (1) приведены спектральные вклады для состава Fe-15Co.

предусматривают образование модулированной магнитной структуры в соответствии с тройной фазовой диаграммой для системы Fe-Cr-Co. Это, в частности, сплавы с меньшим содержанием (14-18) Cr и (12-14) Co, отличающиеся увеличенной намагниченностью. После оптимальных обработок сплавов Fe-(15-16)Cr-(13-14)Co-8W-0.5Ga получены следующие свойства: $M_m = (150-160) \text{ Ам}^2/\text{кг}$, $H_c = (100-150) \text{ А/см}$, $\sigma_B = 2000 \text{ МПа}$, $\sigma_{0.2} = 1400 \text{ МПа}$, $\delta = 5-6 \%$, которые для данной системы являются рекордными. Основываясь на том факте, что в многокомпонентном сплаве Fe-Cr-Co, прошедшем оптимальные обработки, присутствуют три различные фазы, для полученных ЯГР спектров были

С помощью метода ЯГР представляется возможным выделить различные области, составляющие структуру, оценить их состав и объёмные доли, благодаря чему можно оценить влияние начального состава (содержание Co и Cr в сплаве) на фазовый состав.

Как показали электронно-микроскопические исследования, в высокопрочных материалах с умеренными значениями коэрцитивной силы модулированная структура не наблюдается. Поэтому можно полагать, что заданные свойства можно получать на сплавах, составы которых не

восстановлены трёхъядерные распределения сверхтонких параметров. После этого был проведен анализ одного из распределений, соответствующего α_1 фазе. Установлено, что в случае сплава с минимальным содержанием Co проведённые обработки не приводят к полному распаду, при котором происходит образование областей, обеспечивающих магнитную изоляцию α_1 и лучшее сопряжение решёток α_1 и α_2 фаз. В сплавах, которые отличаются содержанием Cr, изменения в относительных вкладах незначительны, но однородность состава в областях всех трех типов выше для сплава с минимальным содержанием Cr, что в свою очередь положительно влияет на магнитные и механические свойства.

Согласно данным, полученным из Мёссбауэровского исследования, установлено, что в сплавах Fe-(15-16)Cr-(13-14)Co-8W-0.5Ga содержание α_2 фазы не превышает 10-12%. Известно, что в традиционно применяемых сплавах Fe-Cr-Co при наличии модулированной структуры мелкие частицы α_1 фазы изолированы прослойками α_2 фазы, и перемагничивание осуществляется путем вращения вектора намагниченности в α_1 фазе. В рассматриваемых сплавах с наилучшими механическими свойствами содержание слабомагнитной фазы недостаточно для магнитной изоляции частиц сильномагнитной фазы. В то же время в сплавах присутствует богатая вольфрамом фаза, которая, согласно нашим данным, при комнатной температуре парамагнитна. В таком случае перемагничивание образцов должно осуществляться путем смещения доменных границ. Выделения богатой вольфрамом парамагнитной фазы, препятствуя смещению, обеспечивают коэрцитивную силу в 100- 150 А/см.

Мёссбауэровское и электронно-микроскопическое исследование структуры сплава Fe-15Cr-13Co-8W-0.5Ga после различной степени деформации (60, 70 и 80%) позволили установить, что для сплавов с пониженным и повышенным содержанием кобальта и хрома необходима различная степень холодной пластической деформации, предшествующей низкотемпературному старению, которая облегчает выпадение частиц богатой вольфрамом η' -фазы, упрочняющих сплав, способствует прохождению более глубокого фазового расслоения и положительно влияет на прочность и коэрцитивную силу сплавов.

В четвертой главе приведены результаты исследования магнитной структуры и ядерного гамма резонанса соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ $0 \leq x \leq 0.12$ с

кубической кристаллической структурой NaZn_{13} , стабилизированной кремнием и алюминием. В данной структуре атомы железа занимают позиции Fe^{I} ($8b$) и Fe^{II} ($96i$) в соотношении 1:12. при замещении атомов Al на Si в $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ наблюдаются изоструктурные концентрационный и температурный магнитные фазовые переходы. Согласно концентрационной магнитной фазовой диаграмме [4], при температуре 100 К соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ обладают антиферромагнитным упорядочением в области концентраций кремния $x \leq 0.024$ и упорядочены ферромагнитно при $x > 0.024$.

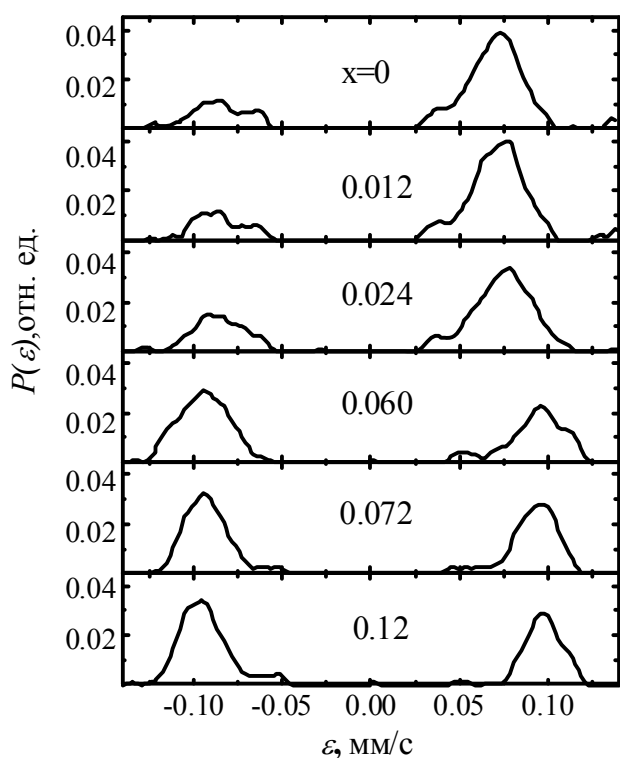


Рис. 4. Расчетные функции двухъядерных распределений квадрупольных сдвигов $P(\varepsilon)$ экспериментальных спектров $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ с разными x при температуре 100 К.

Восстановленные из Мёссбауэровских спектров интерметаллидов с различными x при фиксированной температуре 100 К двухъядерные распределения (рис. 4) квадрупольного сдвига (ε), позволили установить присутствие локальных областей с положительными и отрицательными квадрупольными сдвигами. Вместе с тем, в антиферромагнитных составах преобладают области с положительным квадрупольным сдвигом. Различие знака ε в разных областях кристалла указывает на различное направление главной оси тензора градиента

электрического поля относительно кристаллической решетки в этих областях. В кубической решетке возникает одно выделенное направление, которое, вероятно, совпадает с одним из кристаллографических направлений типа (100) [5]. Проекция межатомных расстояний в ближайшем окружении Fe^{II} на это выделенное направление увеличены для областей с положительным квадрупольным сдвигом и уменьшены для областей с $\varepsilon < 0$. Относительное количество областей с квадрупольными сдвигами разного знака резко изменяется при изменении типа магнитного упорядочения от антиферромагнитного к ферромагнитному.

Для того чтобы выяснить, связано ли наблюдаемое изменение локальных окружений с магнитным упорядочением, или оно обусловлено локальными искажениями структуры вследствие наличия примеси Al и Si, исследованы Мёссбауровские спектры соединений $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ ($0 \leq x \leq 0.12$) при комнатной температуре. Из анализа сверхтонких параметров, полученных из расчёта Мёссбауровских спектров, было установлено, что атомы Al статистически замещают атомы Fe^{II} (96i) в кристаллической решётке, в то время как атомы Si показывают тенденцию к локальному упорядочению.

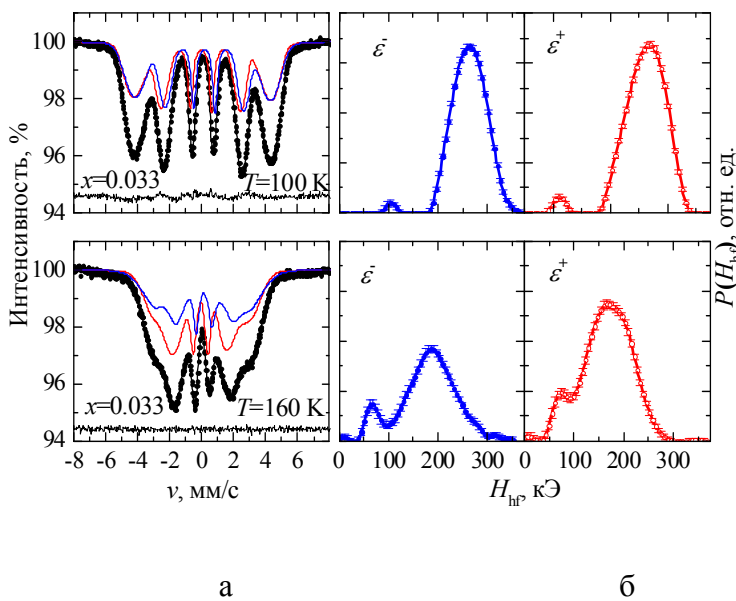


Рис. 5. Расчёт Мёссбауровских спектров в двухъядерном представлении (а) и распределения сверхтонких полей $P(H_{\text{hf}})$ с разным знаком квадрупольного сдвига (б) для соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{1-x})_{13}$ с $x = 0.033$ при 100 K (F состояние) и 160 K (AF состояние).

В другом переходы ферромагнетик – антиферромагнетик - парамагнетик ($x = 0.033$) при увеличении температуры. Восстановленные двухъядерные распределения из полученных при различных температурах Мёссбауровских спектров соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.033}\text{Al}_{0.087})_{13}$ показывают, что переход в антиферромагнитное (AF) состояние сопровождается уменьшением интегральной интенсивности подспектров с отрицательным квадрупольным сдвигом относительно интегральной интенсивности подспектров с положительным квадрупольным сдвигом (рис.5). Проведённый анализ зависимости интегральной интенсивности подспектров с отрицательным квадрупольным сдвигом (s) для обоих интерметаллидов позволил установить, что в области температур, соответствующей существованию AF

С целью установления связи между процессом распределения атомов примеси в решётке и наблюдаемым изменением локальных окружений в интерметаллидах с различным количеством атомов Al и Si, проведено Мёссбауровское исследование соединений $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ с $x = 0.033$ и 0.096. В одном из соединений наблюдается исключительно переход ферромагнетик - парамагнетик ($x = 0.098$), а в

состояния, в соединении $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.033}\text{Al}_{0.087})_{13}$ наблюдается минимальное значение величины s . Отсюда следует, что соединения $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ в AF состоянии характеризуются преимущественно областями с положительным квадрупольным сдвигом, которые вытянуты вдоль направления $[001]$ и сжаты в перпендикулярных направлениях. Расстояние между областями (магнитными кластерами) в плоскости (001) увеличено по сравнению со структурой из недеформированных кластеров. Это ведет к усилению положительных обменных взаимодействий и формированию ферромагнитного слоя кластеров. В то же время, расстояния Fe-Fe между кластерами соседних слоев в направлении $[001]$ уменьшены, и это ведет к усилению отрицательных обменных взаимодействий между слоями кластеров.

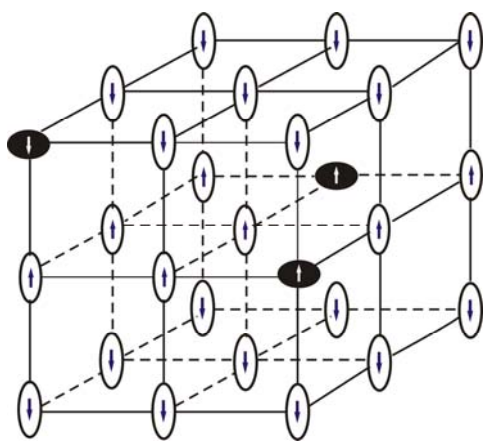


Рис. 6. Модель магнитной структуры соединений $\text{La}(\text{Fe,Si,Al})_{13}$ в антиферромагнитном состоянии.

Таким образом, вследствие очень малого бездиффузионного смещения атомов на уровне локального окружения в структуре появляются элементы тетрагональной симметрии, что позволяет снять кубическое вырождение и сформировать антиферромагнитный дальний порядок. Модель распределения магнитных моментов для антиферромагнитного упорядочения приведена на рис. 6.

Такая модель не противоречит предложенной ранее в [5] кластерной модели магнитного упорядочения данных соединений. Вместе с тем, она позволяет снять противоречие между послойным антиферромагнитным упорядочением и кубической кристаллической структурой сплавов с Al.

Пятая глава посвящена исследованию магнитных фазовых переходов в соединении $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$. Бинарное соединение CeFe_2 является ферромагнетиком с $T_C = 210$ К. В интерметаллидах CeFe_2 с ГЦК структурой типа MgCu_2 при замещении небольшого количества (3-6%) атомов Fe на атомы другого сорта наблюдаются магнитные фазовые переходы AF-F-P с увеличением температуры. В отличие от соединений $\text{La}(\text{Fe,Si,Al})_{13}$, температурный магнитный фазовый переход в антиферромагнитную фазу при охлаждении сопровождается изменением типа

симметрии кристаллической решётки – возникновением ромбоэдрических искажений структуры.

По аналогии с соединением $\text{La}(\text{Fe},\text{Si},\text{Al})_{13}$ проведено Мёссбауэровское исследование при комнатной температуре интерметаллидов $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$. Из сравнения экспериментальных данных, полученных из расчёта Мёссбауэровских спектров с данными, полученными из расчёта статистического распределения примеси в решётке, было установлено, что в данной системе Si замещает атомы Fe статистически.

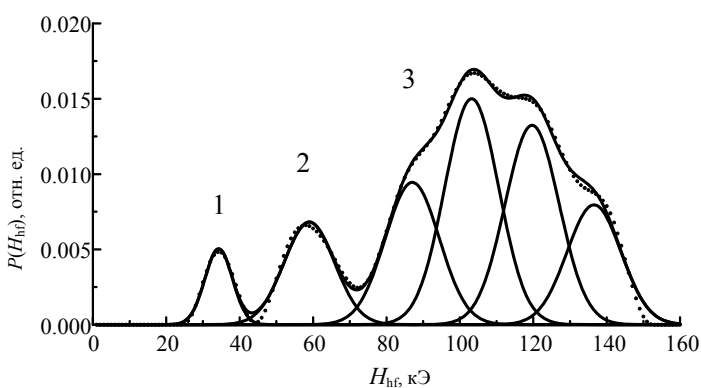


Рис. 7. Пример расчёта распределения $P(H_{hf})$ соединения $\text{Ce}(\text{Fe}_{0.93}\text{Si}_{0.07})_2$ при 100 К.

Высокополевая область 3 описана четырьмя линиями с полушириной около 15 кЭ; пики 1 и 2 – одиночными линиями с полушириной 8 и 11 кЭ, соответственно. Относительная интенсивность линии 1 постепенно увеличивается с увеличением температуры. При $T = 140$ К она достигает значений,

соответствующих окружению с одним атомом Si в первой координационной сфере с координационным числом 6 в парамагнитном состоянии. Интенсивность пика 2 также возрастает с ростом температуры, и его удается выделить только при температурах ниже 130 К. При переходе в ферромагнитное состояние пик 2 сливается с широким пиком 3. Вероятно, пик 1 связан с резонансным атомом Fe в позиции $1b$ и 1 атомом Si в $3e$ в ромбоэдрической решётке с типом симметрии $R3m$. Для различных структур появление 1 атома кремния в окружении, как правило, приводит к уменьшению поля на ядре Fe на 27-30 кЭ. Поэтому пик 2 по его положению и интенсивности соответствует резонансному атому Fe в позиции $1b$ без примеси в ближайшем окружении. Тогда компоненты пика 3 связаны с атомом Fe в позиции $3e$. При переходе в ферромагнитную фазу магнитные моменты Fe во всех позициях становятся одинаковыми. Следовательно, пики 2 и 3 должны слиться, а одна из компонент пика 3 (с примесными атомами в ближайшем окружении) должна усилить пик 1. Именно это и наблюдается в эксперименте. Таким образом,

модель магнитной структуры, предложенная в [6], в целом находит свое подтверждение при интерпретации Мёссбауэровских данных.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что введение 0.5% Ga в высокопрочный магнитотвердый сплав Fe-22Cr-15Co-9W оказывает положительный эффект на его пластичность вследствие формирования структуры, оптимальной по составу и объёмным долям фазовых компонент.

2. Обнаружено, что в трёхкомпонентных сплавах Fe-10Cr-xGa, Fe-15Co-xGa и Fe-22Co-xGa, $0.5 \leq x \leq 4$ галлий в основном входит в твердые растворы базовых сплавов. В сплавах Fe-10Cr-xGa он предотвращает их расслоение, а в сплавах Fe-22Co-xGa препятствует упорядочению, делая твердые растворы более однородными.

3. Обнаружено, что во время постдеформационного низкотемпературного отжига сплавов Fe-Cr-Co-W-Ga с пониженным содержанием хрома и кобальта формируется структура, состоящая в основном из твердого раствора и парамагнитной фазы. Механизм процессов перемагничивания в такой системе связан с задержкой смещения доменных границ на парамагнитных выделениях дисперсной фазы.

4. Определены концентрационные и температурные зависимости параметров сверхтонких взаимодействий в интерметаллидной системе $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ с изоструктурным фазовым переходом ферромагнетик-антиферромагнетик. Установлено, что соединения содержат локальные области с положительными и отрицательными квадрупольными сдвигами, относительное количество которых изменяется при магнитном фазовом переходе. На основе полученных данных предложена модель формирования слоистой антиферромагнитной структуры.

5. Показано, что в $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Al}_{0.12})_{13}$ алюминий статистически замещает атомы железа в позициях 96i, а кремний преимущественно замещает лишь шесть позиций из девяти в ближайшем окружении атомов Fe. В соединении $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ происходит статистическое замещение кремнием атомов железа в позициях 16c.

6. Построена магнитная фазовая диаграмма соединений $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$. Методом ЯГР экспериментально подтверждена предложенная ранее модель

антиферромагнитной структуры $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ при низких температурах, согласно которой в соединении присутствуют две структурно и магнитно неэквивалентные позиции железа с существенно различающимися величинами магнитных моментов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Serikov, V.V. Effect of alloying elements on the structure peculiarities and mechanical properties of high-strength magnetic Fe-Cr-Co based alloys / V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, A.V. Vershinin, E.V. Belosero, N.V. Mushnikov, G.V. Ivanova, N.N. Shchegoleva, M.A. Uimin. // *Solid State Phenomena*. – 2011. – Vol. 168-169. – P. 388-391.
2. Белозеров, Е.В. Роль пластической деформации в формировании высокопрочного состояния в магнитотвёрдых сплавах Fe-Cr-Co-W-Ga / Е.В. Белозеров, Г.В. Иванова, Н.Н. Щеголева, В.В.Сериков, Н.М.Клейнерман, А.В.Вершинин, В.С Гавико, Н.В. Мушников. // *Физика металлов и металловедение*. – 2012. – Т. 113. – №3. – С. 330-336.
3. Белозеров, Е.В. Высокопрочные магнитотвёрдые сплавы на основе Fe-Cr-Co с пониженным содержанием хрома и кобальта / Е.В. Белозеров, Н.В. Мушников, Г.В. Иванова, Н.Н. Щеголева, В.В. Сериков, Н.М. Клейнерман, А.В. Вершинин, М.А. Уймин. // *Физика металлов и металловедение*. – 2012 – Т. 113. – №4. – С. 339-346.
4. Kleinerman, N.M. Effect of initial composition on the phase composition of high-strength Fe-Cr-Co-based magnetic materials / N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, A.V. Vershinin, E.V. Belosero, N.V. Mushnikov // *Solid State Phenomena*. – 2012. – Vol. 190. – P. 188-191.
5. Kleinerman, N.M. Fine structure of Fe-Co-Ga and Fe-Cr-Ga alloys with low Ga content / N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, A.V. Vershinin, N.V. Mushnikov, L.A. Stashkova // *AIP Conference Proc. "MSMS-2014"*. – 2014. – Vol. 1622. – P. 126-133.
6. Serikov, V.V. Formation of solid solutions of gallium in Fe-Cr and Fe-Co alloys: Mössbauer studies and first-principles calculations / V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, A.V. Vershinin, N.V. Mushnikov, A.V. Protasov, L.A. Stashkova, N.N. Shchegoleva, O.I. Gorbatov, Yu.N. Gornostyrev // *J. Alloys Compounds*. – 2014. –Vol. 614. – P. 297-304.

7. Сериков, В.В. Мёссбауэровское исследование магнитного фазового перехода в соединениях $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ / В.В. Сериков, Н.М. Клейнерман, А.В. Вершинин, Н.В. Мушников // Физика металлов и металловедение. – 2012. – Т. 113. – С. 901-907.
8. Serikov, V.V. Mossbauer study of changes in magnetic structure of $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ compounds / V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, A.V. Vershinin // Solid State Phenomena. – 2012. – Vol. 190. – P. 530-533.
9. Сериков, В.В. Структура соединений $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ в парамагнитном состоянии / В.В. Сериков, Н.М. Клейнерман, А.В. Вершинин, В.С. Гавико, Н.В. Мушников. // Физика твёрдого тела. – 2013. – Т. 55. – С. 448-454.
10. Vershinin, A.V. Magnetic phase transitions in $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ ($x = 0.033$ and 0.096) compounds / A.V. Vershinin, V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, V.S. Gaviko, N.V. Mushnikov // J. Alloys Compounds. – 2015. – Vol. 621. – P. 274-282.
11. Вершинин, А.В. Магнитные фазовые переходы в соединениях $\text{Ce}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_2$ / А.В. Вершинин, В.В. Сериков, Н.М. Клейнерман, Н.В. Мушников, Е.Г. Герасимов, В.С. Гавико, А.В. Прошкин // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115. – С. 1276-1283.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Илюшин, А.С. Структурные фазовые переходы и спиновые переориентации в редкоземельных фазах Лавеса: дисс. доктора физ.-мат. наук: / Илюшин А.С. – Москва: МГУ. – 1989. – 312с.
- [2] Русаков, В.С. Мёссбауэровская спектроскопия локально-неоднородных систем / В.С. Русаков; под ред. Л.А. Габдулина. – Алматы, 2000. – 438 с.
- [3] Structure of W-enriched phase in Fe-Cr-Co-W-Ga Alloys / G.V. Ivanova, N.N. Shchegoleva, V.V. Serikov, N.M. Kleinerman, E.V. Belozarov // J. Alloys Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 1809-1814.
- [4] Podgornykh, S.M. Magnetic phase diagram of the $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_x\text{Al}_{0.12-x})_{13}$ compounds: field induced ferromagnetism near critical concentration / S.M. Podgornykh, Ye.V. Shcherbakova, G.M. Makarova, A.A. Yermakov // Abstract book of Euro-Asian Symposium EASTMAG – 2007 “Magnetism on a nanoscale”, Kazan, 2007. – P. 166.
- [5] Magnetic properties of $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Al}_{1-x})_{13}$ determined via neutron scattering and Mössbauer spectroscopy / R.B. Helmholtz, T.T.M. Palstra, G.J. Nieuwenhuys, J.A.

Mydosh, A.M. van der Kraan, K.H.J. Buschow // Phys. Rev. B. – 1986. – Vol. 34. – P. 169-173.

[6] Magnetic ground state of pure and doped CeFe_2 / L. Paolasini, B. Ouladdiaf, N. Bernhoeft, J-P. Sanchez, P. Vulliet, G.H. Lander, P. Canfield // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90. – P. 057201-1–057201-4.

Отпечатано на ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 экз. зак № 16
объем 1 печ. л. формат 60×84 1/16
620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18