

О Т З Ы В

на автореферат диссертации Ершова Николая Владимировича
«ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АТОМНОЙ
СТРУКТУРЫ МАГНИТОМЯГКИХ ЖЕЛЕЗОКРЕМНИСТЫХ
СПЛАВОВ», представленной на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика
конденсированного состояния.

Сплавы на основе железа и кремния занимают важное место среди современных материалов в связи с их широким применением в практике в качестве магнитопроводов. По удельной доле в промышленном производстве и эксплуатационным свойствам, в частности, высоким значениям магнитной проницаемости и индукции насыщения, железокремнистым сплавам нет равных среди других магнитных материалов. Актуальность структурных исследований и выяснения связи атомной структуры с физическими свойствами, прежде всего магнитными, не вызывает сомнений.

Знание механизмов формирования магнитных свойств сплавов дает возможность целенаправленного формирования свойств магнитомягких материалов и является основой для разработки новых технологий получения материалов с оптимальным сочетанием физических свойств.

В диссертационной работе поставлена и успешно решена задача - выяснение зависимости формирования атомной структуры магнитомягких железокремнистых сплавов в кристаллическом и нанокристаллическом состояниях от разных факторов, в частности, от содержания кремния и условий термической обработки, которые оказывают определяющее влияние на практически важные магнитные свойства. Эта задача решалась с применением современных теоретических и экспериментальных методов исследования атомного, локального упорядочения в бинарных сплавах, что обеспечило получение положительных результатов.

Полученные в работе новая информация о механизмах формирования магнитных свойств кристаллических и нанокристаллических сплавов на основе железа важны для разработки и совершенствования промышленных технологий производства магнитомягких материалов и изделий из них. Тема диссертации полностью соответствует пунктам Перечня критических технологий Российской Федерации, утвержденных указами Президента РФ.

В исследованиях структуры железокремнистых сплавов реализован комплексный подход, сочетающий анализ спектров рассеяния рентгеновских лучей, включая диффузное рассеяние, и Мессбауэровскую спектроскопию, что позволило получить исчерпывающие данные об атомной структуре. В частности, впервые обнаружены субнанометровые локально упорядоченные кластеры, состоящие из пар ячеек с атомной структурой B₂, которые формируются при высоких температурах в парамагнитном состоянии и сохраняются после охлаждения в ферромагнитном состоянии. Показано, что при термической обработке B₂-кластеры преимущественно ориентируются

вдоль направления приложения магнитного поля или растягивающего напряжения, что является подтверждением справедливости гипотезы, ранее предложенной Л. Неелем и другими исследователями, о направленном упорядочении атомов, как причине возникновения в сплавах наведенной магнитной анизотропии.

Для интерпретации экспериментальных результатов первопринципными теоретическими методами исследован механизм формирования ближнего порядка в железокремнистых сплавах и установлена определяющая роль локального упорядочения на магнитное состояние сплава.

Показано, что атомная структура сплавов Fe-Si-Nb-Cu-B (FineMet), полученных быстрой закалкой из расплава, состоит из нанообластей с ближним порядком в расположении атомов, характерным для сплава железо-кремний с ОЦК решеткой, размерами ~ 2 нм. После отжига в нанокристаллах α -FeSi образуются области - 10 нм, появляется упорядоченная фаза Fe_3Si , объемная доля которой при концентрации кремния 13.5 % достигает 80 %.

Это обстоятельство является принципиально важным для объяснения изменения характера наведенной магнитной анизотропии в сплавах, подвергнутых отжигу под действием растягивающей нагрузки, потому что, в отличие от раствора α -FeSi, фаза Fe_3Si имеет отрицательную константу тетрагональной магнитострикции. После отжига под нагрузкой в решетке нанокристаллов обнаружены локальные деформации: межплоскостные расстояния увеличиваются вдоль направления приложения растягивающего напряжения и уменьшаются в поперечном направлении пропорционально приложенному напряжению. Величина деформации распределена анизотропно по кристаллографическим направлениям - вдоль направлений $\langle 111 \rangle$ деформации не наблюдаются, тогда как в направлениях $\langle 100 \rangle$ они максимальны. Показано, что распределение деформаций по направлениям соответствует теории упругих деформаций с учетом кубической симметрии решетки. Деформации обуславливают ориентацию намагниченности в нанокристаллах вдоль или поперек ленты в зависимости от знака константы магнитоупругого взаимодействия, который изменяется на противоположный по мере увеличения концентрации кремния из-за высокой доли Fe_3Si фазы.

Важным достижением автора является развитие представлений о происхождении наведенной магнитной анизотропии в кристаллических и нанокристаллических железокремнистых сплавах, основанных на полученных данных о структуре и фазовом составе, которая зависит от концентрации кремния, магнитного состояния и условий термической обработки.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит, в частности, в том, что новые знания вносят значительный вклад в наше понимание механизмов связи структуры и свойств в разупорядоченных системах на Fe-Si основе. Методы и подходы, апробированные в диссертации, могут быть использованы при решении подобных задач в отношении других сплавов.

Автореферат диссертационной работы Н. В. Ершова дает достаточно полное представление об основных направлениях исследования и полученных результатах. Результаты работы опубликованы в реферируемых журналах, обсуждались на отечественных и международных конференциях. Оформление автореферата соответствует требованиям, устанавливаемым Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации. Автореферат отвечает всем требованиям пунктов 7 и 8 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 30 января 2002 г. № 74 (с изменениями, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 20 июня 2011 г. № 475).

Диссертационная работа по актуальности, новизне, совокупности полученных результатов, полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а её автор, Ершов Николай Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Петербургского института ядерной физики
НИЦ «Курчатовский институт»

Голосовский Игорь Викторович

«24» января 2020 г.

Адрес: 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща, д. 1, НИЦ
«Курчатовский Институт» - ПИЯФ. Телефон: 8-813-71-46415, e-mail:
golosovsky_iv@pnpi.nrcki.ru

Подпись руки Голосовского И.В.
ЗАВЕРЯЮ
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ Зиновьева А.Н.

24. 01. 2020



С отзывом ознакомлен

/Н.В. Ершов/

31 января 2020 года