

ОТЗЫВ

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

Диссертационная работа Ершова Н. В. посвящена исследованиям закономерностей формирования атомной структуры магнитомягких железо-кремнистых сплавов в ее корреляции с магнитными свойствами. Кристаллические сплавы железа с кремнием являются основой электротехнической стали и по их удельной доле в промышленном производстве и эксплуатационным свойствам им нет равных среди других магнитных материалов. Недавно были открыты и быстро нашли практическое применение нанокристаллические сплавы Fe-Si-Nb-Cu-B, в которых нанокристаллы железо-кремний встроены в аморфную матрицу. В структуре лент сплавов Fe-Si-Nb-Cu-B после быстрой закалки из расплава имеются области с ближним порядком в расположении атомов, характерным для сплава железо-кремний с ОЦК решеткой, размером около 2 нм. После нанокристаллизующего отжига в нанокристаллах α -FeSi, достигающих 10 нм, по мере увеличения содержания кремния появляется упорядоченная фаза Fe₃Si, объемная доля которой при концентрации кремния 13.5 % достигает 80 %.

В этих сплавах имеет место наведенная магнитная анизотропия, которая, формируясь при определенных условиях, накладывается на магнитокристаллографическую анизотропию, в результате чего изменяется доменная структура и, как следствие, зависимость магнитных свойств от направления. Наведенную магнитную анизотропию можно формировать, менять ее тип, степень остроты в процессе отжига в магнитном поле или в поле механических напряжений. На основе всего предшествующего опыта сформировались представления о структурной диффузионной природе наведенной магнитной анизотропии в сплавах железо-кремний, для объяснения ее происхождения была сформулирована теория направленного упорядочения атомов (Неель, Танигучи и Ямомото). Однако до работ автора диссертации отсутствовали прямые доказательства реализации направленного упорядочения в системе Fe-Si.

Существенным достижением автора является развитие представлений о происхождении наведенной магнитной анизотропии в кристаллических и нанокристаллических железокремнистых сплавах, основанные на новых данных о структуре и фазовом составе, их зависимости от концентрации кремния, магнитного состояния и условий термической обработки. Наиболее существенным новым результатом исследований является тот факт, что пары атомов Si-Si, находящимися во второй координационной сфере друг от друга в ОЦК решетке, формируются не при термообработке в магнитном поле или под нагрузкой, как предполагалось в более ранних теориях, а в процессе охлаждения сплава, т.е. еще в парамагнитном состоянии. В ферромагнитном состоянии при термомагнитной или термомеханической обработке пары

атомов кремния или пары ячеек с локальным упорядочением В2-типа преимущественно ориентируются вдоль направления приложения магнитного поля или растягивающего напряжения. Таким образом, после охлаждения именно вдоль этого направления перемагничивание значительно облегчается, что является первым прямым подтверждением справедливости теории Нееля, Танигучи, Ямомото. Становится очевидным, что области $D0_3$ фазы, которые появляются при содержании 8 % кремния, не оказывают благоприятного влияния на формирование наведенной магнитной анизотропии в железокремнистом сплаве.

Полезные результаты получены для нанокристаллических сплавов системы Fe-Si-Nb-Cu-B. Показано, что при 6 %Si при отжиге в магнитном поле или под нагрузкой наводится продольная магнитная анизотропия и определены оптимальные условия для получения наилучших магнитомягких свойств. При 13,5 %Si в магнитном поле наводится продольная, а под нагрузкой поперечная магнитная анизотропия. При отжиге под нагрузкой, после охлаждения в нанокристаллах имеются деформации ОЦК решетки, продольные растяжения межплоскостных расстояний и их сжатия в поперечном направлении. Исследования фазового состава нанокристаллов показали, что аналогично кристаллическим железокремнистым сплавам в них по мере увеличения концентрации кремния появляется и растет объемная доля $D0_3$ фазы со стехиометрией Fe_3Si . При средней концентрации кремния в сплаве 13.5 % она достигает 80% объема. И именно ее появление и рост объемной доли в нанокристаллах объясняет смену типа магнитной анизотропии в файнмете с продольной на поперечную, которая наводится при отжиге ленты под действием растягивающей нагрузки, так как Fe_3Si фаза в отличие от α -Fe или неупорядоченного твердого раствора Si в железе имеет отрицательную магнитострикцию. Отдельное практическое значение имеют результаты исследования термической стабильности структуры и свойств нанокристаллических сплавов.

Практическая значимость результатов, полученных в диссертационной работе Ершова Н.В., состоит в том, что новые знания о закономерностях формирования атомной структуры и магнитных свойств железокремнистых сплавов дают возможность целенаправленной разработки образцов с требуемыми свойствами и высокой термической стабильностью, становятся основой для разработки лабораторных технологий получения магнитомягких сплавов на основе железа с оптимальным сочетанием магнитных свойств.

В частности, автор показал, что при повышении концентрации Si в сплаве до 8% В2 кластеры постепенно превращаются в $D0_3$ кластеры, при этом расстояние между ближайшими атомами Si, несмотря на увеличение концентрации кремния в сплаве, увеличивается от ' a ' до ' $a\sqrt{2}$ '. Аналогичный эффект увеличения расстояния между атомами Si в 'парах' имеет место при переходе из парамагнитного состояния в ферромагнитное. Из текста автореферата не вполне понятно, следует ли рассматривать эти эффекты как независимые или взаимосвязанные. Еще одним вопросом является такой: возможно ли в исследуемых сплавах при увеличении в них концентрации атомов Si формирование не $D0_3$ кластеров, а так называемой

«модифицированной- D0_3 » структуры (или кластеров)? Эта структура отличается расположением пар однородных атомов и в большей степени соответствует формированию пар из пар атомов B2 структуры рядом друг с другом без увеличения расстояния между атомами в паре 'Si-Si' при увеличении содержания атомов кремния в сплаве.

Научных замечаний по автореферату не имеется.

Автореферат диссертационной работы Н.В. Ершова дает полное представление об основных направлениях исследований и полученных результатах. Результаты работы опубликованы в реферируемых журналах, обсуждались на отечественных и международных конференциях, а сам автор имеет высокую репутацию среди специалистов по методам исследования атомной структуры неупорядоченных объектов. Оформление автореферата соответствует требованиям, устанавливаемым Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, материал изложен логично и с высокой степенью доказательности. Автореферат отвечает всем требованиям пунктов 7 и 8 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 30.01.2002 г. N74 (с изменениями, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 20 июня 2011 г. N 475).

Диссертационная работа по актуальности, новизне, набору экспериментальных и теоретических подходов, а также по совокупности полученных результатов и разработанных автором теоретических положений является крупным научным вкладом, 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.

Профессор, д.ф.-м. н.

Tel: +7 (495) 955-01-34

email: i.golovin@misis.ru

Почтовый адрес:

119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4

И. С. Головин

«13» 01 2020 г.

Головин Игорь Станиславович,
доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра металловедения цветных металлов
НИТУ «МИСиС»

И. С. Головина заверяю:

КУЗНЕЦОВА А.Е.

С отзывом ознакомлен
/Н.В. Ершов/
27 января 2020 года