

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

На правах рукописи

ШЕВЕРДЯЕВА Полина Макаровна

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ
ПЕРЕНОСА В МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2006

Работа выполнена на кафедре магнетизма физического факультета
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель	кандидат физико-математических наук, доцент Н.С. Перов
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, г.н.с. Н.Г. Бебенин доктор физико-математических наук, профессор П.Н. Стеценко
Ведущая организация	Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской Академии Наук

Защита состоится “___” октября 2006 года в 16-00 часов на заседании
диссертационного совета К 501.001.02 в Московском государственном
университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2, г. Москва,
Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория ЮФА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического
факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан “19” сентября 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 501.001.02,
кандидат физико-математических наук

И. А. Никанорова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последние годы уделяется большое внимание исследованию влияния магнитного поля на процессы электронного и ионного переноса в различных системах. В диссертационной работе рассмотрены два важных аспекта влияния магнитного поля на процессы переноса – на ионный перенос в электрохимических системах и на электронный перенос в аморфных магнитных материалах.

Исследование явлений, происходящих в электрохимических системах, важно как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения. В диссертации рассматривается влияние магнитного поля на один из важнейших электрохимических показателей – на электродный потенциал металлов. Детальное исследование этого эффекта необходимо для понимания механизмов влияния магнитного поля на многие электрохимические процессы, связанные с электродным потенциалом (например, на электроосаждение и коррозию в магнитном поле), и на причины этого влияния, которые до сих пор еще остаются не до конца установленными. До сих пор не до конца выяснено, что отвечает за изменение электродного потенциала в магнитном поле – магнитное поле или намагниченность образца, и для заданного ферромагнитного или неферромагнитного материала нельзя сказать достоверно, будет ли наблюдаться изменение его электродного потенциала в магнитном поле.

Не меньший интерес представляют магнитостатические и кинетические свойства лент аморфных сплавов на основе *Co*. Подобные сплавы широко используются в технике для создания датчиков магнитного поля. При изучении процессов переноса в аморфных лентах различного состава основное внимание уделяется эффекту гигантского магнитоимпеданса, который наблюдается на переменном токе в широком

диапазоне частот. Аморфные ленты на основе *Co* вызывают особенный интерес в качестве материала для датчиков на основе этого эффекта, поскольку обладают близкой к нулю магнитострикцией (менее 10^{-7}). В то же время кинетические эффекты в аморфных лентах на постоянном токе, такие как эффект Холла и магнитосопротивление, изучены гораздо слабее, хотя, как показывает опыт исследований в кристаллических материалах, подобные данные необходимы для установления механизмов электронного транспорта и взаимодействия магнитной и электронной подсистем материала в формировании его свойств [1].

Цели работы состояли в следующем:

- исследовать влияние магнитного поля на электродный потенциал электродов *Fe*, *Ni*, *Co* и некоторых других ферромагнитных и неферромагнитных материалов в растворах солей различных кислот;
- исследовать изменение полевой зависимости электродного потенциала от концентрации электролита;
- исследовать магнитостатические свойства ленты аморфного металлического сплава на основе *Co* ($Co_{66}Fe_4B_{14}Si_{15}$), отожженной при различных температурах, меньших температуры кристаллизации;
- исследовать при различных температурах эффект Холла и магнитосопротивление ленты аморфного металлического сплава на основе *Co*, отожженной при различных температурах, меньших температуры кристаллизации;
- выявить взаимосвязь магнитостатических и гальваномагнитных свойств этих лент.

В ходе выполнения работы решались следующие *задачи*:

- создание установки, позволяющей исследовать влияние магнитного поля на электродный потенциал;
- исследование влияния магнитного поля на электродный потенциал ферромагнитных (железа, никеля, кобальта, пермаллоя) и некоторых неферромагнитных материалов в различных электролитах;
- создание установки, позволяющей исследовать влияние магнитного поля на магнитотранспортные свойства аморфных лент при различных температурах;
- исследование влияния отжига на магнитостатические и магнитотранспортные свойства аморфных быстрозакаленных сплавов.

Научная новизна

- Обнаружено влияние величины магнитного поля и концентрации электролита на электродный потенциал ряда металлов; предложена феноменологическая модель, объясняющая влияние магнитного поля на электродный потенциал.
- Впервые показано, что изменение электродного потенциала железного электрода в хлориде железа (III) является линейной функцией логарифма концентрации электролита при концентрациях от 0.005 моль/л до 0.1 моль/л.
- Впервые исследовано влияние процессов частичной кристаллизации на эффект Холла и магнитосопротивление лент аморфного металлического сплава на основе $Co [Co_{66}Fe_4B_{14}Si_{15}]$, отожженных на воздухе и в вакууме, найдена корреляция в поведении коэффициентов аномального эффекта Холла и сопротивления.

- Обнаружено появление положительного магнитосопротивления в лентах аморфного сплава $Co_{66}Fe_4B_{14}Si_{15}$ после их отжига при температурах от $350^{\circ}C$ до $400^{\circ}C$.

Научная и практическая ценность

- Созданы:
 - 1) автоматизированная установка, позволяющая исследовать влияние магнитного поля на электрохимические процессы в полях до 6 кЭ при комнатных температурах;
 - 2) автоматизированная установка, позволяющая проводить исследования магнитотранспортных свойств образцов в полях до 16 кЭ при температурах от 4.3К до комнатных.
- Установлены факторы, обуславливающие изменение электродного потенциала ферромагнитных металлов под влиянием магнитного поля.
- Предложена модель, объясняющая появление положительного магнитосопротивления в лентах аморфного сплава $Co_{66}Fe_4B_{14}Si_{15}$ при температурах от $350^{\circ}C$ до $400^{\circ}C$.

Достоверность

Достоверность результатов обеспечивается хорошей повторяемостью результатов и использованием хорошо обоснованных методик.

Апробация работы

Результаты исследований, составляющие основу диссертации, представлялись на следующих конференциях и семинарах:

- НМММ-2002, Москва, Россия, 24 – 28 июня 2002 года
- ICM 2003, Рим, Италия, 27 июля – 1 августа 2003 года

- Ломоносов-2006, Москва, Россия, 12 апреля 2006 года
- IWNS-2006, Oviedo, Spain, 20 – 23 июня 2006 года.

Личный вклад автора

Автоматизированные установки для измерения электродного потенциала металлов и для измерения гальваномагнитных свойств пленок созданы лично автором. Самостоятельно написано программное обеспечение для управления установками. Подготовка образцов и измерения магнитных и транспортных свойств также проводились лично автором. Обсуждение и анализ полученных экспериментальных результатов проводились авторами соответствующих работ совместно.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов и списка литературы. Она изложена на 133 страницах и проиллюстрирована 52 рисунками. Список цитируемой литературы содержит 106 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы, научная новизна и практическая ценность проведенных исследований, а также сформулирована цель и перечислены задачи работы. Приводится список публикаций и указывается личный вклад автора.

В **первой главе** приведен обзор литературы. Первая часть обзора (параграф 1.1) посвящена влиянию магнитного поля на электродный потенциал.

Электродным потенциалом называют э.д.с. электрохимической цепи, построенной из стандартного водородного электрода и электрода

окислительно-восстановительной полуреакции. Как было показано многими авторами [2], при помещении второго электрода в магнитное поле величина электродного потенциала изменяется. Для железного электрода величина изменения всегда положительна и достаточно велика – в поле 8 кЭ были получены значения смещения электродного потенциала ΔE до 80 мВ [2]. Результаты сильно зависят от типа и концентрации электролита, в котором находится электрод. Величина ΔE при этом нелинейно зависит от поля, намагниченности и концентрации электролита и не имеет насыщения в магнитном поле. Данные для остальных материалов противоречивы: некоторые исследования обнаруживают влияние магнитного поля на электродный потенциал никеля, кобальта и некоторых неферромагнитных материалов [3], другие отрицают наличие этого влияния [4]. Основные модели электрохимии показывают, что для железного электрода в магнитном поле 10 кЭ величина ΔE не должна превышать величины порядка 10 мкВ, то есть на три порядка меньше, чем экспериментально полученные значения. С другой стороны, модели магнитогидродинамики [4] не могут объяснить исключительную роль ферромагнетизма в данном эффекте, так как в больших магнитных полях эффект должен наблюдаться для всех материалов.

Вторая часть обзора (параграф 1.2) посвящена кинетическим эффектам в аморфных магнитных лентах. В ней приводятся основные теоретические понятия, методика расчета гальваномагнитных характеристик и полученные к настоящему времени результаты по влиянию отжига на магнитостатические и гальваномагнитные свойства аморфных магнитных лент. Основное внимание в этой части уделяется влиянию отжига на магнитостатические и гальваномагнитные свойства аморфных магнитных лент на основе *Co*. Данные ленты хорошо исследованы с точки зрения влияния отжига на их магнитоимпедансные

свойства. К настоящему моменту основные исследования по влиянию структурной релаксации на гальваномагнитные свойства проведены для лент на основе железа [5]. Гальваномагнитные свойства аморфных лент на основе кобальта исследованы только в аморфном и кристаллическом состояниях [6]. Сопоставление данных магнитоимпедансных и гальваномагнитных измерений могло бы дать новые сведения о структуре этих лент.

Вторая глава посвящена вопросам методики эксперимента и установкам, изготовленным автором. В параграфе 2.1 описывается установка по исследованию влияния магнитного поля на электрохимические процессы. Установка позволяет исследовать изменение электродного потенциала под влиянием магнитного поля при комнатных температурах в полях до 6 кЭ. Работа установки и обработка результатов измерений полностью автоматизированы. В параграфе приводится блок-схема установки, назначение компонентов, алгоритм работы программного обеспечения и методика расчета величины сдвига электродного потенциала ΔE в магнитном поле. В параграфе 2.2 приводятся данные об образцах для электрохимических исследований. Использовались ферромагнитные электроды – *Fe* (0.9999), *Ni* (0.9999), *Co* (0.9999), *Pu* (45% *Ni*) – и неферромагнитные – *Cu* (0.999), *Al* (0.999), *Bi* (0.999), нержавеющая сталь 08X18H10. В качестве электролитов использовались *FeCl₃* (0.01 – 0.5 моль/л), лимонная кислота (0.2 моль/л), щавелевая кислота (0.85 моль/л), уксусная кислота (0.03 моль/л), сернокислый никель *NiSO₄* (0.5 моль/л) и сернокислая медь *CuSO₄* (0.5 моль/л).

Параграфы 2.3–2.5 содержат описание установки для гальваномагнитных исследований, приводится блок-схема и принцип работы установки. Также приводится краткое описание криостата, изготовленного для этой установки в фирме RTI (г. Черноголовка).

Установка может измерять сопротивления от 10^{-6} Ом до 10^9 Ом в полях до 16700 Э и при температурах от 4.3 К до 300 К. Параграф 2.5 описывает программное обеспечение для различных режимов измерений и для обработки результатов. Автором было предусмотрено несколько режимов исследования гальваномагнитных свойств: 1) автоматическое измерение зависимости сопротивления Холла и электрического сопротивления от магнитного поля при двух ориентациях тока и поля; 2) измерение в полуавтоматическом режиме, когда экспериментатор сам выбирает точки, в которых будут проводиться измерения показателей; 3) температурное измерение сопротивления, когда параллельно снимаются значения сопротивления и температуры при нагреве или охлаждении образца. Отдельно была написана программа обработки данных, которая рассчитывает аномальную и нормальную постоянные Холла и величину магнитосопротивления.

Образцы для транспортных исследований и обоснование их выбора описаны в параграфе 2.6. Используемые аморфные ленты состава $Co_{66}Fe_4B_{14}Si_{15}$ были приготовлены методом закалки расплава в лаборатории профессора Cheol Gi Kim (Национальный университет Чунгнам, Корея) [7]. После приготовления ленты были отожжены в магнитном поле 2 Э в течение 2 минут при температурах от 200 до 450 °С (ниже температуры кристаллизации) на воздухе и в вакууме. Толщина аморфных лент составляла 20 мкм, длина образцов около 7 мм, а их ширина – 2 мм. Как показывают результаты магнитоимпедансных исследований на этих лентах, ленты, отожженные на воздухе и в вакууме, существенно отличаются по своим свойствам: ленты, отожженные на воздухе, имеют асимметричный ГМИ-профиль, в то время как ленты, отожженные в вакууме, такими свойствами не обладают [7].

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния магнитного поля на электродный потенциал металлов. Рассмотрены экспериментальные результаты для ряда ферромагнитных и неферромагнитных металлов. Из ферромагнитных материалов исследовались железо, никель, кобальт и пермаллой (45% Ni), из неферромагнитных материалов – медь, алюминий, висмут и нержавеющая сталь 08X18H10. Наибольшая величина изменения электродного потенциала (ΔE) – 23 мВ – была достигнута для железного электрода в хлорном железе $FeCl_3$ в поле 5.5 кЭ, поэтому наиболее детально железный электрод исследовался в этом электролите. Для всех значений концентрации электролита, которая изменялась от 0.002 до 0.2 моль/л, величины ЭДС являлись нелинейными функциями приложенного магнитного поля, при уменьшении концентрации зависимости становились более линейными. Насыщения ΔE в магнитном поле до 5.5 кЭ не происходило (см. рис. 1а).

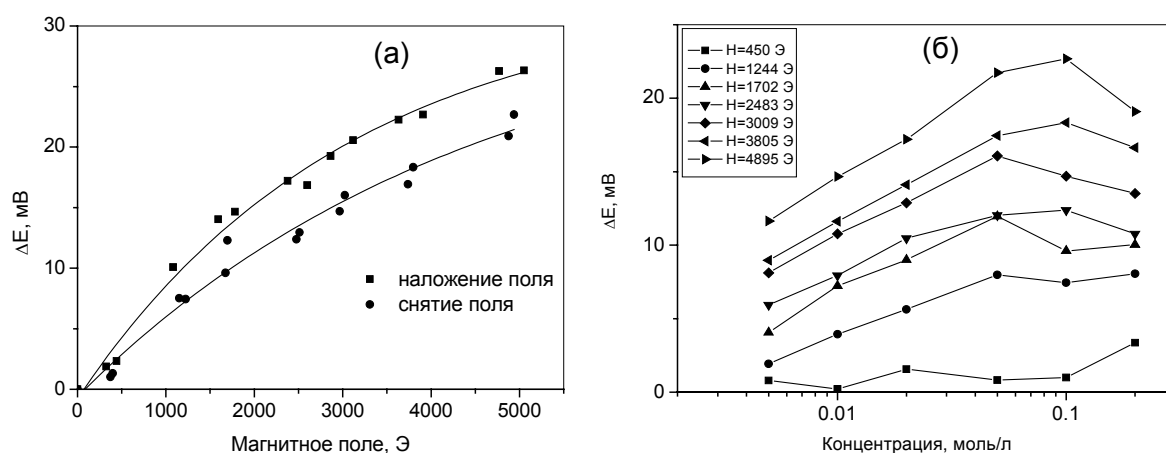


Рис. 1. (а) зависимость ΔE от магнитного поля для железного электрода в хлорном железе для концентрации электролита 0.1 моль/л; (б) зависимость ΔE от концентрации электролита для различных амплитуд поля.

По результатам для всех концентраций был построен график зависимости напряжения между электродами от логарифма концентрации

(рис. 1б). Зависимости ΔE от концентрации являются немонотонными функциями и имеют максимум в области концентраций 0.05-0.1 моль/л, который связан с увеличением скорости растворения электрода в электролите при больших концентрациях соли. При небольших концентрациях ΔE является линейной функцией логарифма концентрации C , выраженной в относительных единицах, а производная ΔE по $\lg C$ является нелинейной функцией намагниченности (рис. 2а).

Электродный потенциал железа был исследован также в растворах щавелевой и лимонной кислот, при этом его зависимость от приложенного магнитного поля оставалась нелинейной, значения ΔE в максимальном поле составляли около 1 мВ и 8 мВ, соответственно.

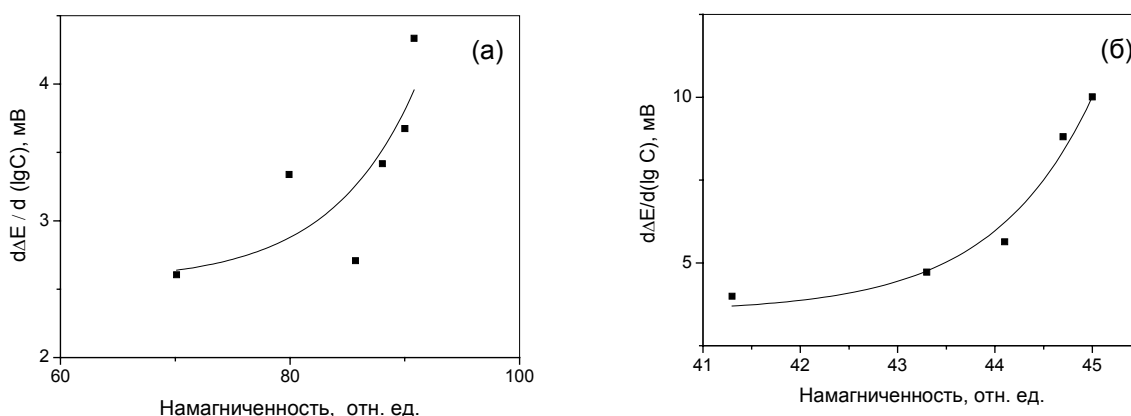


Рис. 2. Зависимость производной по логарифму концентрации от магнитного поля (а) железо; (б) пермаллой.

Для пермалловых электродов были получены аналогичные результаты, значения ΔE были несколько меньше и не превышали 20 мВ в хлорном железе. Зависимость $d\Delta E/d \lg C$ была нелинейна по намагниченности (рис. 2б).

Результаты для электродов, изготовленных из никеля и кобальта, оказались отрицательными. В хлорном железе на никеле был обнаружен

небольшой эффект – около 2.5 мВ в поле 5.5 кЭ, однако объяснением этого служит тот факт, что никель вытесняет железо из соли, и оно оседает на электрод, в результате чего в электродной реакции принимает участие не никель, а железо. На никелевом электроде, помещенном в раствор сернокислого никеля, а также в щавелевую или лимонную кислоты, эффекта обнаружено не было. Не изменился и электродный потенциал кобальта в щавелевой и лимонной кислотах. Из немагнитных материалов были исследованы медь, алюминий, висмут и нержавеющая сталь. Медь исследовалась в растворе медного купороса, алюминий, висмут и нержавеющая сталь – в лимонной кислоте. Ни на одном из материалов эффекта не было обнаружено в пределах точности измерений (около 0.03 мВ).

Для объяснения полученных результатов было предложено несколько возможных моделей влияния магнитного поля на электродный потенциал: а) взаимодействие движущихся ионов с магнитным полем (сила Лоренца); б) воздействие градиента магнитного поля, образованного доменной структурой электрода, на ионы; в) взаимодействие электролита с намагниченной поверхностью.

Рассмотрим модели (а) и (б). Величина энергии взаимодействия ионов с магнитным полем существенно меньше (на 6-7 порядков) тепловой энергии ионов kT . К тому же при механизмах (а) и (б) эффект должен наблюдаться для всех типов электродов, что противоречит опытным данным.

Рассмотрим модель (в) в применении к железному и пермаллоевому электродам. Как было показано выше, между значениями намагниченности и ΔE корреляция отсутствует (при увеличении магнитного поля выше поля технического насыщения намагниченность остается постоянной, тогда как ΔE продолжает расти). Разность эффекта для ориентаций плоскости

электрода параллельно и перпендикулярно по отношению к направлению магнитного поля составляет не более 20% в максимальном поле, хотя намагниченности при параллельной и перпендикулярной ориентации отличаются в том же поле более чем в 4 раза. С другой стороны, было показано, что изменение ΔE прямо пропорционально логарифму концентрации, причем коэффициент пропорциональности является функцией магнитного момента M . Записывая это выражение в виде:

$$\Delta E = f(M) \lg C, \quad (1.)$$

и сопоставляя с формулой Нернста

$$\Delta E = RT/F \times \lg(C(M)/C_0), \quad (2.)$$

где $C(M)$ – некоторая эффективная концентрация ионов вблизи намагниченной поверхности, C_0 – концентрация электролита, R – газовая постоянная, T – температура, F – постоянная Фарадея, получаем выражение

$$C(M) = C_0 e^{G(M)} \quad (3.)$$

Это выражение свидетельствует о том, что концентрация ионов вблизи намагниченной поверхности является функцией магнитного момента. Данное утверждение качественно согласуется с выводами, сделанными другими авторами [2]; можно было бы предложить степенную зависимость вида $G(M) = A \cdot M^\alpha$. В рамках данной модели отсутствие эффекта на кобальте и никеле может быть объяснено особенностями поверхностной магнитной структуры, и вероятно, в больших полях эффект мог бы наблюдаться – что не противоречит результатам работ [2], [3], так как в этих работах эффект наблюдался в полях около 15 кЭ. Аналогично эффект мог бы наблюдаться и на некоторых немагнитных электродах при подборе соответствующих электролитов.

В *четвертой главе* рассматривается влияние условий отжига на магнитоэлектрические и гальваномагнитные свойства аморфных магнитных лент $Co_{66}Fe_4B_{14}Si_{15}$.

Магнитоэлектрические свойства исследовались с помощью вибрационного магнетометра. С увеличением температуры отжига петли гистерезиса образцов, отожженных в вакууме, не изменяли существенно своей формы. С другой стороны, серия образцов, отожженных на воздухе, имела существенно другой вид петель – с увеличением температуры отжига их петли гистерезиса трансформировались в так называемые «перетянутые» петли (см. рис. 3а, 3б). Средняя часть петли (до выхода на насыщение) по-прежнему обладала малой коэрцитивностью. С увеличением температуры отжига некоторая часть образца (от 5 до 10%) не перемагничивалась в полях до 300 Э (поле смыкания петли), то есть в образце возникала высококоэрцитивная фаза. Влияние этой фазы на форму петли гистерезиса становилось заметным при температурах отжига около $380^{\circ}C$. Как можно судить из петель гистерезиса (рис. 3б), толщина высококоэрцитивного слоя, то есть доля неперемагничивающегося до 250 Э объема, при температуре отжига $450^{\circ}C$ составляет около 10% от толщины ленты (около 2 мкм).

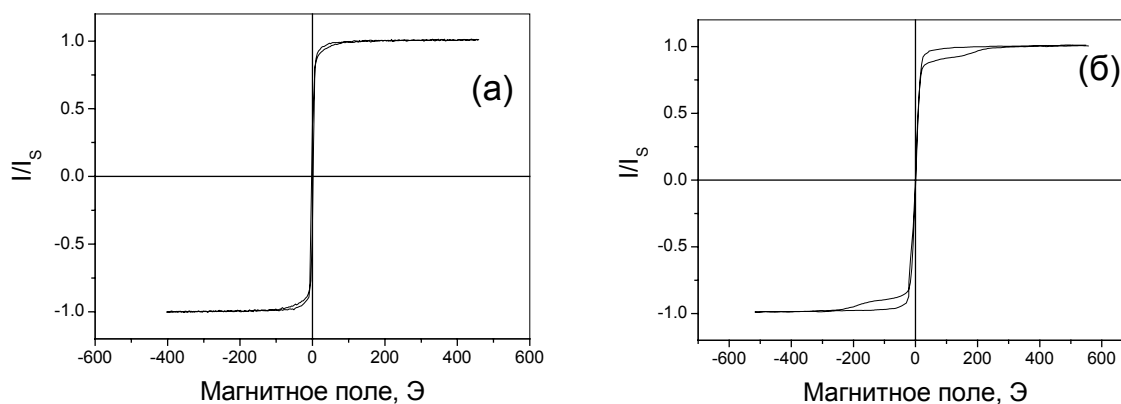


Рис 3. Петля гистерезиса для образцов, отожженных на воздухе при температурах: (а) $380^{\circ}C$; (б) $450^{\circ}C$. Намагниченность дана в относительных единицах.

После отжига в образце появлялась наведенная анизотропия, которая увеличивалась с увеличением температуры отжига. Для образцов, отожженных в вакууме, она была незначительна (рис. 4а), тогда как для образцов, отожженных на воздухе, – достаточно заметна и увеличивалась с ростом температуры отжига (рис. 4б).

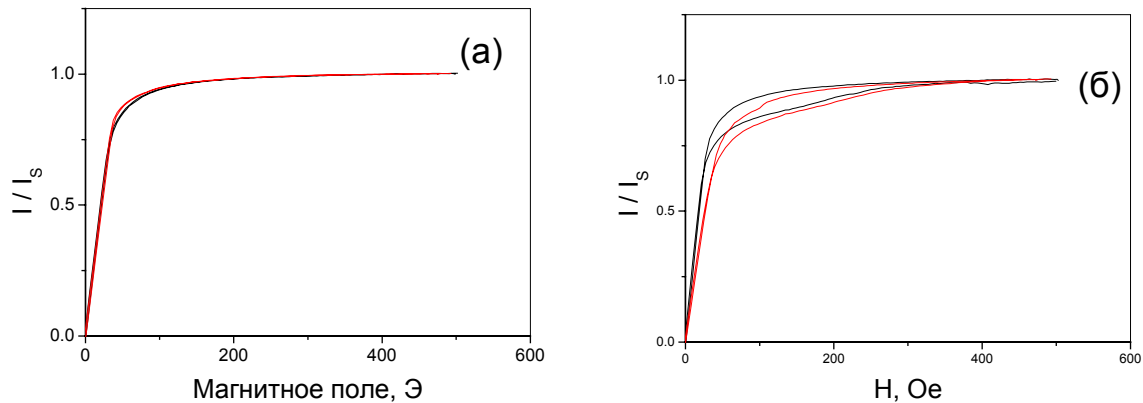


Рис. 4. Петли гистерезиса для лент, отожженных при температуре 450°C (а) на воздухе, (б) в вакууме для двух ориентаций оси ленты относительно направления магнитного поля. Намагниченность дана в относительных единицах. Приведена половина петли.

Измерения транспортных свойств проводились в полях до 16.5 кЭ , в диапазоне температур от 77 К до 300 К . Постоянные Холла определялись из соотношения:

$$\rho_H = R_0 B + R_S I, \quad (4.)$$

где ρ_H – сопротивление Холла, R_0 – нормальная постоянная Холла, B – магнитная индукция, R_S – аномальная постоянная Холла, I – намагниченность насыщения.

Для исключения паразитных эффектов напряжение на контактах усреднялось по двум направлениям тока и поля. Так как данные обладали большим разбросом вследствие неоднородности отжига по длине ленты, то по образцам набиралась статистика: каждая температура отжига в каждой

серии была представлена пятью образцами. Степень разброса увеличивалась с ростом температуры отжига примерно до температуры 380⁰С, а затем снижалась. Зависимости сопротивления Холла от магнитного поля имели хорошо выраженную линейную высокополевою часть, из экстраполяции которой были получены значения намагниченности (по формуле для тонких пленок). Для всех температур отжига аномальная и нормальная постоянные Холла были положительными.

Первоначально измерения проводились при комнатной температуре, рассматривалась зависимость свойств (сопротивления Холла, электрического сопротивления, намагниченности, аномальной и нормальной постоянной Холла, подвижности) от температуры отжига. Для всех свойств было характерно малое изменение с температурой отжига, которое находилось в пределах погрешности (см. рис. 5а-5г). Значения большинства показателей для отжига в вакууме и на воздухе отличались больше, чем на статистическую погрешность, только для области температур 350-380⁰С (см. например рис. 5а). Исключение составила только нормальная постоянная Холла (рис. 5б). Поведение сопротивления с температурой хорошо коррелировало с поведением аномальной постоянной Холла: для отжига в вакууме наблюдался минимум в районе 350⁰С, для отжига на воздухе – максимум. Проверить наличие зависимости $R_s \sim \alpha\rho + \beta\rho^2$, которая, как правило, выполняется для аморфных материалов, тем не менее, невозможно, так как и сопротивление, и аномальная постоянная Холла имеют большую дисперсию, а сопротивление мало меняется. Значения подвижности, рассчитанные из нормальной постоянной Холла и сопротивления, превысили 0.2–0.3 см² · В⁻¹ · с⁻¹, то есть проводимость обусловлена делокализованными носителями тока.

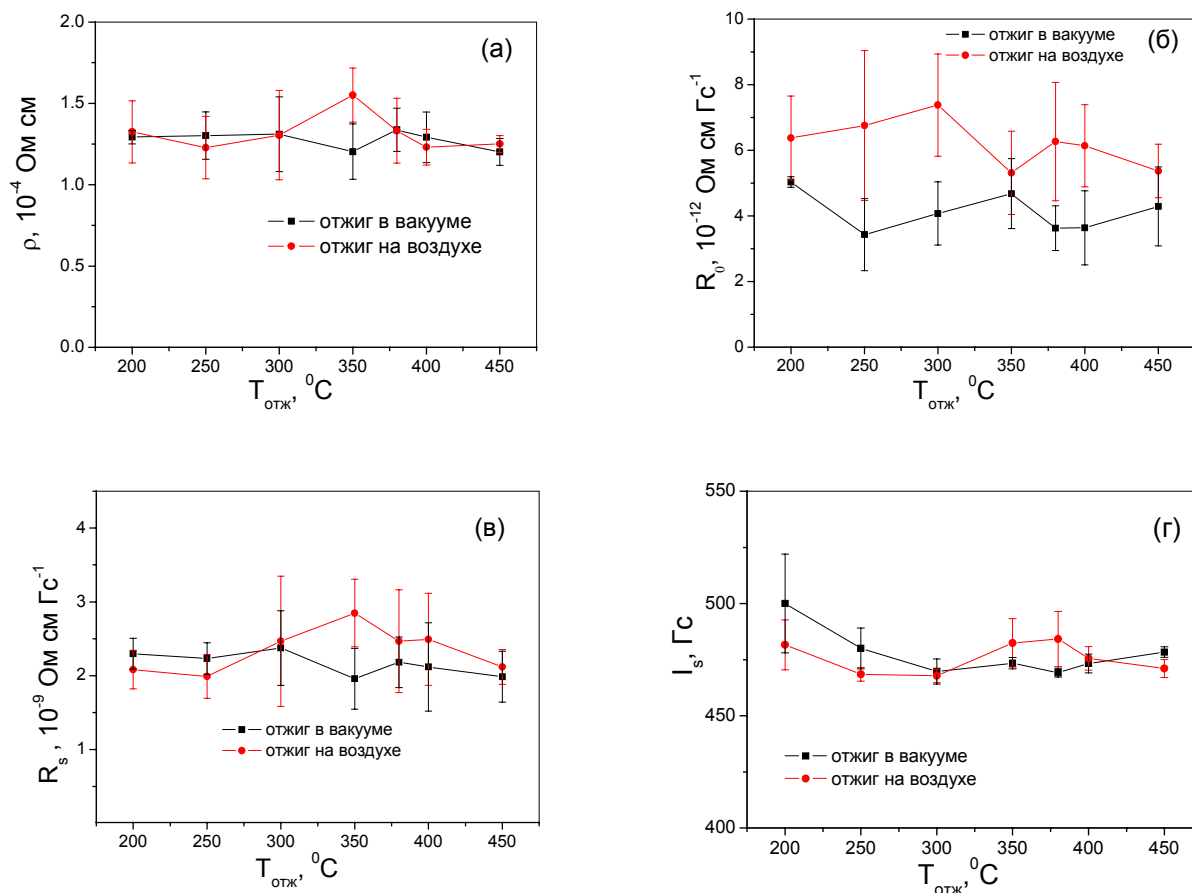


Рис. 5. Зависимость от температуры отжига (а) электрического сопротивления; (б) нормальной постоянной Холла; (в) аномальной постоянной Холла; (г) намагниченности насыщения.

Затем было проведено исследование температурного поведения коэффициентов Холла с помощью постоянного нагрева и стабилизации температуры через каждые 15-30 градусов. Для всех образцов было характерно снижение нормальной постоянной Холла и рост аномальной постоянной и электрического сопротивления с повышением температуры измерений. Электрическое сопротивление линейно росло с температурой и при изменении температуры от 77 К до 300 К возрастало в среднем на 2-3%. Нормальная постоянная Холла линейно зависела от температуры для отжига в вакууме, для отжига на воздухе – нелинейно, а общее изменение с

температурой составляло примерно 10% для обоих типов отжига. Аномальная постоянная Холла нелинейно зависела от температуры, и, следовательно, от электрического сопротивления. Для температуры отжига 450⁰С температурная зависимость приближалась к линейной, то есть выполнялась корреляция $R_s \sim \alpha\rho$.

Поперечное магнитосопротивление измерялось при расположении плоскости образца перпендикулярно магнитному полю. При комнатной температуре величина отношения сигнал/шум для магнитосопротивления была менее 1, тогда как при 77 К она превышала 10, поэтому все измерения магнитосопротивления проводились при температуре 77 К.

Величина магнитосопротивления была отрицательна и достигала величины около 0.03% в полях 1-2 кЭ для серии образцов, отожженных на воздухе. Для серии образцов, отожженных в вакууме, это значение было несколько меньше – 0.02%. Насыщение магнитосопротивления достигалось уже в полях 500-1000 Э (рис. 6а). При увеличении температуры отжига пик становился более широким, а при температурах отжига 350, 380 и 400⁰С (в меньшей степени) в небольших полях наблюдалось положительное магнитосопротивление (рис. 6б) – становился заметен провал в центре кривой (в малых полях).

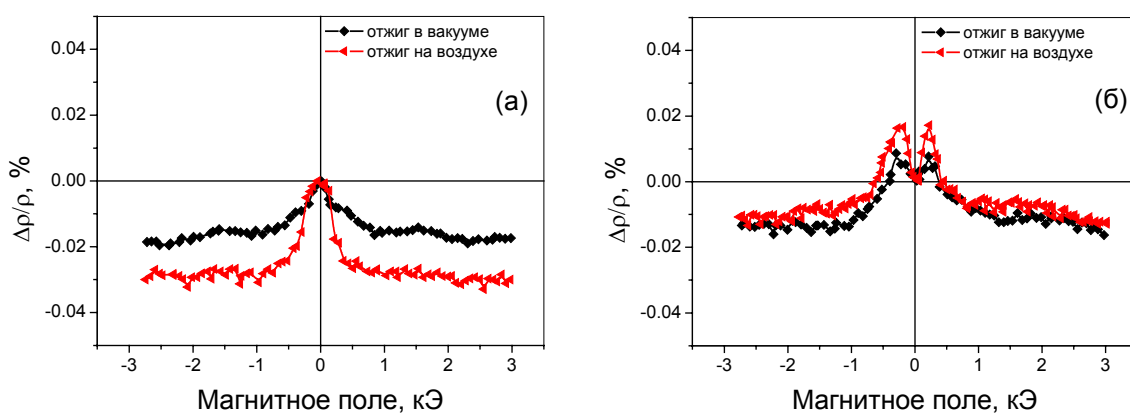


Рис 6. Зависимость магнитосопротивления от поля для отжига при (а) 250⁰С; (б) 380⁰С.

Положительное магнитосопротивление наблюдалось как для лент, отожженных в вакууме, так и на воздухе, но для лент, отожженных на воздухе, пик более ярко выражен. Для 400°C провал еще присутствует, с увеличением температуры отжига выше 400°C он исчезает, магнитосопротивление возрастает почти до 0.04%, и насыщение достигается уже после 2 кЭ для ленты, отожженной на воздухе (соответственно 0.035% и 1 кЭ для ленты, отожженной в вакууме).

Появление положительного магнитосопротивления в этих лентах не может быть объяснено неточностью ориентировки (проводилась тщательная юстировка образца, при которой ошибка от неточности ориентировки не будет превышать 10^{-6}), а также магнитострикцией, так как в этих лентах ее величина мала (порядка 10^{-7}). Влияние лоренцевского магнитосопротивления также крайне мало, около 10^{-8} , тогда как значения положительного магнитосопротивления достигают величины $2 \cdot 10^{-4}$. Анизотропное магнитосопротивление не может служить объяснением, так как для лент, отожженных в вакууме, магнитная анизотропия незначительна, а анизотропия лент, отожженных на воздухе, увеличивается с увеличением температуры отжига, не имея максимума. Положительное магнитосопротивление же, как следует из экспериментальных данных, имеет максимум в районе 380°C . Вдобавок, техническое насыщение лент при ориентации их плоскости перпендикулярно направлению магнитного поля достигается в полях около 5 кЭ, то есть гораздо больших, чем характерное поле, в котором наблюдается положительное магнитосопротивление.

Для того, чтобы объяснить подобное поведение магнитосопротивления, был предложен механизм, основанный на рассеянии электронов, зависящем от направления спина. Как известно, в процессе структурной релаксации в аморфной матрице возникают

нанокристаллиты. Они достаточно малы, что позволяет рассматривать их в качестве однодоменных магнитных гранул. Таким образом, структура образца напоминает структуру гранулированных металлических сплавов, например Co-Cu или Co-Ag, в которых, как известно, наблюдается гигантское магнитосопротивление [8]. Однако сопротивление нанокристаллитов примерно в 4 раза меньше, чем сопротивление аморфной матрицы, а объем, занимаемый ими, достаточно мал по сравнению с объемом ленты. Это приводит к тому, что требование, необходимое для возникновения гигантского магнитосопротивления, не выполняется [8], и наблюдаемое отрицательное магнитосопротивление в лентах сравнительно мало. С увеличением температуры отжига объем, занимаемый нанокристаллитами, увеличивается, что приводит к увеличению отрицательного магнитосопротивления, что и показывает эксперимент. Спин-зависящее рассеяние приводит к возникновению отрицательного магнитосопротивления, только если магнитные моменты соседних гранул в среднем ориентированы антипараллельно. Для того, чтобы достигнуть состояния с такой степенью беспорядка, температура отжига должна быть достаточно большой, и как следствие, для температур отжига 200–300⁰С и 450⁰С отрицательное магнитосопротивление наблюдается во всем интервале полей. Если же такое состояние не достигнуто, и магнитные моменты соседних гранул расположены полностью хаотично не в нулевом поле, то сопротивление растет с увеличением магнитного поля, достигает максимального значения в поле, которое соответствует максимуму беспорядка, и затем уменьшается. Данное поведение в точности воспроизводит экспериментальные зависимости магнитосопротивления, полученные для температур 350⁰С–400⁰С.

Как следует из модели спин-зависящего рассеяния, образцы, отожженные на воздухе, должны иметь большую степень беспорядка, чем образцы, отожженные в вакууме. Это является следствием того, что высококоэрцитивный слой, образующийся на поверхности под влиянием отжига на воздухе, в значительной степени обогащен нанокристаллитами. Можно показать, что добавочное изменение сопротивления за счет окисления на воздухе не должно превышать около 25%, что хорошо согласуется с экспериментом.

В конце диссертации помещены основные результаты и выводы.

Основные результаты и выводы

1. Изготовлены автоматизированные установки для проведения измерений электродного потенциала металлических материалов в магнитном поле и для исследования гальваномагнитных свойств материалов в диапазоне температур от 4.2 К до 400 К в магнитных полях до 16.7 кЭ; разработано и отлажено программное обеспечение автоматизированных установок, обеспечивающее проведение комплексных исследований в различных режимах.
2. Обнаружено, что изменение электродного потенциала железа в магнитном поле нелинейно зависит от величины магнитного поля и от величины намагниченности. На кобальте, никеле, висмуте, алюминии, меди, нержавеющей стали 08X18H10 эффект не был обнаружен в пределах точности измерений.
3. Впервые установлено, что изменение электродного потенциала железа нелинейно зависит от концентрации электролита, имея максимум в районе 0.05–0.1 моль/л, причем при малых концентрациях электролита эффект пропорционален логарифму концентрации.

4. Результаты были объяснены в рамках представлений об изменении концентрации ионов электролита вблизи поверхности намагниченного электрода.
5. Обнаружено, что с увеличением времени отжига на воздухе приповерхностный слой аморфной ленты $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{V}_{15}\text{Si}_{15}$ становится магнитножестким. Это происходит вследствие образования неоднородного по толщине частично закристаллизованного поверхностного слоя, в котором при отжиге на воздухе появляются оксиды железа и кобальта. При увеличении температуры отжига толщина закристаллизованного поверхностного слоя увеличивается.
6. Максимальное изменение гальваномагнитных свойств при отжиге как в вакууме, так и на воздухе наблюдается в диапазоне температур отжига 350°C - 380°C , что связано с появлением зародышей кристаллической фазы при этих температурах.
7. При отжиге лент в вакууме и на воздухе ниже температуры кристаллизации имеет место корреляция аномального эффекта Холла и сопротивления. Эта корреляция не описывается механизмом бокового смещения.
8. В небольших полях (до 200 Э) при отжиге при 300 - 400°C обнаружено положительное магнитосопротивление как для лент, отожженных в вакууме, так и для лент, отожженных на воздухе. При отжиге в полях более 200 Э магнитосопротивление отрицательно. Появление положительного магнитосопротивления, вероятно, связано со спин-зависимым рассеянием в системе нанокристаллических зерен в аморфной матрице при наличии наведенной при отжиге анизотропии распределения осей легкого намагничивания нанокристаллов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Perov N.S., Sheverdyayeva P.M., Inoue M., Effect of magnetic field on the electrode potential of metals, Book of Abstract MMM2001, GR-09, p.338.
2. Gan'shina E.A., Kim C.G., Kim C.O., Kochneva M.Yu., Perov N.S., Sheverdyayeva P.M., Depth profile of magnetic anisotropy in annealed Co-based amorphous ribbons, Book of Abstract MMM2001, GE-12, p.316.
3. Gan'shina E.A., Kim C.G., Kim C.O., Kochneva M.Yu., Perov N.S., Sheverdyayeva P.M., Magnetostatic and magneto-optical properties of Co-based amorphous ribbons, J. Magn. Magn. Mater. 239 (2002) 484-486.
4. Perov N.S., Sheverdyayeva P.M., Inoue M., Effect of magnetic field on the electrode potential of metals, J. Appl. Phys. 91 (2002) 8557-8559.
5. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O., Depth profiles of magnetic anisotropy in annealed Co-based amorphous ribbons, J. Appl. Phys. 91 (2002) 8438-8440.
6. Перов Н.С., Шевердяева П.М., Иноуэ М., Влияние магнитного поля на электродный потенциал металлов. НМММ-2002. Сборник трудов XVIII международной школы-семинара 24-28 июня 2002, Москва, стр. 637-639.
7. Gan'shina E.A., Perov N.S., Kochneva M.Yu., Sheverdyayeva P.M., Kim C.G., Kim C.O., Weak magnetic field annealing effect on magneto-optical and magnetostatic properties of Co-based amorphous ribbons, J. Magn. Magn. Mater. 254-255 (2003) 428-430.
8. Perov N., Sheverdyayeva P., Inoue M., Investigations of the magnetic field effect on electrochemical processes, Abstract of International Conference on Magnetism (ICM-2003) (July 27-August 1, 2003, Rome, Italy), p. 752.
9. Gan'shina E., Perov N., Kochneva M., Sheverdyayeva P., Kim C.G., Kim C.O. "Depth profiles of magnetic anisotropy in annealed Co-based amorphous ribbon", Proceeding of TUT International Workshop on Novel

Electromagnetic Functions of Nano-scaled Materials (October 6-7, 2003, Toyohashi, Japan), pp. 55-60.

10. Perov N., Sheverdyayeva P., Inoue M., Investigations of the magnetic field effect on electrochemical processes, J. Magn. Mater. 272-276P3 (2004) 2448-2449.
11. Sheverdyayeva P.M., Prudnikov V.N., Perov N.S., Konstantinova A.S., Kim C.G., Granovsky A.B., Effect of heat treatment on transport and magnetic properties of Co based amorphous alloys, Abstracts of Eight International Workshop on Non-crystalline Solids (June 20-23 2006, Gijón, Spain), P05, p.12.
12. Шевердяева П.М. Влияние температурной обработки на транспортные и магнитные свойства аморфных лент на основе Co, Сборник тезисов международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов 2006» (12 апреля 2006, Физический факультет МГУ, Москва), стр. 118-119.

Список цитируемой литературы

1. Андреевко А.С., Березовец В.А., Грановский А.Б., Золотухин И.В., Инoue M., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В., Палевский Т., Инверсное магнитосопротивление в магнитных гранулированных композитах (FeCoB)-(Al₂O₃), ФТТ 45 (2003) 1446–1449.
2. Dass A., Counsil J. A., Gao X., Leventis N., Magnetic Field Effects on the Open Circuit Potential of Ferromagnetic Electrodes in Corroding Solutions, J. Phys. Chem. B 109 (2005) 11065-11073.
3. Rhen F.M.F., Hinds G., Coey J.M.D., Magnetic field effect on the rest potential of zinc, Electrochemistry Communications 6 (2004) 413-416.

4. Waskaas M., Magnetic field effect on electrode reactions. Effects on the open-circuit potential of electrodes in solutions of different magnetic properties, *Acta Chemica Scandinavica* 50 (1996) 516-523.
5. Lanotte L., Ausanio G., Iannotti V., Correlation between Hall effect, structural relaxation and magnetoelastic coupling in $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$ amorphous alloy, *J. Magn. Magn. Mater.* 196-197 (1999) 865-867.
6. Bordin G., Buttino G., Cecchetti A., Poppi M., Hall effect and magnetoresistance in Co-based amorphous and crystallized alloys, *J. Magn. Magn. Mater.* 172 (1997) 291-300.
7. Kim C.G., Jang K.J., Kim D.G. Yoon S.S., Analysis of asymmetric GMI in field-annealed Co-based amorphous ribbons, *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999) 2114-2116.
8. Zhang S., Levy P.M., Conductivity and magnetoresistance in magnetic granular films, *J. Appl. Phys.* 73 (1993) 5315–5319.