УДК 537.6/.9:53.096/.098

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В АНОМАЛИЯХ ЭФФЕКТА ХОЛЛА И МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛАВОВ FE-V-AL ВБЛИЗИ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

[1]Окулов В.И., [1,2]Марченков В.В., [1]Говоркова Т.Е., [1]Лончаков А.Т., [1]Усик А.Ю., [1,2]Подгорных С.М., [1,2]Жевстовских И.В., [1]Окулова К.А., [1]Бобин С.Б., [1]Дерюшкин В.В.

[1]Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург;
[2]Уральский федеральный университет, Екатеринбург, e-mail: okulov@imp.uran.ru

Проведено экспериментальное исследование не изучавшихся ранее температурных и магнитополевых зависимостей поперечной и холловской компонент электросопротивления ферромагнитного сплава Fe-V-Al с составами, близкими к стехиометрическому (Fe_2VAl), с целью подтверждения аномально сильного влияния на гальваномагнитные свойства малых вариаций содержания алюминия в широких интервалах температуры и напряженности магнитного поля. Новые данные, полученные на образцах двух составов, показывают, что вплоть до температур порядка сотен кельвин малое изменение содержания непереходного элемента (на проценты) приводит к значительному изменению (на десятки процентов) величин аномальных гальваномагнитных эффектов. Дано объяснение наблюдавшихся явлений на основе гипотезы о резком изменении плотности состояний электронов с энергией Ферми в стехиометрическом составе сплава.

Ключевые слова: сплавы, гальваномагнитные свойства, спонтанная намагниченность, отрицательное магнитосопротивление, аномальный эффект Холла

STUDY OF THE MAGNETIC ORDERING MANIFESTATIONS IN THE HALL EFFECT AND MAGNETORESISTANCE ANOMALIES IN FE-V-AL ALLOYS NEAR STOICHIOMETRIC COMPOSITION

[1]Okulov V.I., [1,2]Marchenkov V.V., [1]Govorkova T.E., [1]Lonchakov A.T., [1]Usik A.Yu., [1,2]Podgornykh S.M., [1,2]Zhevstovskikh I.V., [1]Okulova K.A., [1]Bobin S.B., [1]Deryushkin V.V.

[1]M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of UB RAS, Ekaterinburg;
[2]Ural Federal University, Ekaterinburg, e-mail: okulov@imp.uran.ru

There has been performed new experimental study of temperature and magnetic field dependences of transverse and Hall resistivity components of ferromagnetic alloy Fe-V-Al. One were taken the compositions near the stoichiometric one (Fe_2VAl) with a view of confirming anomalously strong influence of small variations of aluminum content on galvanomagnetic properties in wide intervals of the temperatures and magnetic field strengths. The new data obtained on the samples of two compositions show that up to the temperature of the order of hundred Kelvin small variation of non-transition element content (within percents) leads to considerable (within a few tens of percents) variation of anomalous galvanomagnetic effects. Phenomena observed can be explained on the basis of hypothesis about sharp change of the density of states of electrons with the Fermi energy in stoichiometric content of the alloy.

Keywords: alloys, galvanomagnetic properties, spontaneous magnetization, negative magnetoresistance, anomalous Hall Effect

Многочисленные исследования электронных и магнитных свойств сплавов железо-ванадий-алюминий с составами вблизи стехиометрического (Fe_2VAl) привели к обнаружению уникальных эффектов, состоящих, как правило, в кардинальном изменении основных физических параметров и закономерностей их изменения при малых вариациях содержания какого-либо компонента. Наблюдение такого рода эффектов, начало которым было положено работой [1], часто проводилось на образцах, подвергнутых различного рода термообработкам. Однако очевидно, что физически обоснованное решение задач по выявлению характерных особенностей электронной структуры, порождающих наблюдаемые явления, возможно лишь на основе подходов, в рамках которых эксперименты выполняются на объектах в термодинамически равновесном состоянии. Такому подходу следуют авторы настоящей работы при изучении характерных закономерностей, присущих упомянутым сплавам.

Одним из наиболее интересных недавних результатов, касающихся закономерностей магнитного упорядочения сплавов, обогащенных атомами железа, стало обнаружение сильного влияния содержания атомов алюминия на величину и характер проявления спонтанного намагничения [2]. В качестве расширения объема имеющихся результатов, необходимых для развития представлений о физической природе обнаруженного эффекта, в настоящей работе получены и проанализированы новые экс-

периментальные данные по магнитосопротивлению и аномальному эффекту Холла в сплавах Fe-V-Al с изменением содержания вблизи стехиометрического состава как атомов железа, так и атомов алюминия. Исследованы зависимости измеренных параметров в значительно более широких, чем ранее, интервалах температуры и напряженности магнитного поля и обнаружены закономерности, позволившие подтвердить развиваемую интерпретацию данных.

Материалы и методы исследования

Эксперименты выполнены на двух образцах сплава: образца *1*, обогащенного только железом (сплав $Fe_{2.1}V_{0.91}Al_{0.99}$), и образца *2*, обогащенного железом и алюминием (сплав $Fe_{2.05}V_{0.91}Al_{1.04}$).

Сплавы для исследований были выплавлены в индукционной печи в атмосфере очищенного аргона с трехкратным переплавом для получения лучшей однородности и затем медленно охлаждены вместе с печью. По результатам рентгеноструктурного анализа оба сплава являлись однофазными с упорядоченной структурой типа $L2_1$, характерной для полных сплавов Гейслера. Образцы для исследований вырезались электроискровым способом и имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 1,5×3,0×10,0 мм^3. Атомное содержание элементов и однородность образцов определялись методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с помощью растрового электронного микроскопа Inspect F (FEI Company), оснащенного приставкой рентгеновского микроанализа EDAX (относительная погрешность < 1 ат.%). Химический анализ состава проводился для центральной части образцов и по двум краям.

Магнитосопротивление и эффект Холла измерялись по стандартной 4-зондовой методике на постоянном токе с коммутацией направления электрического тока и внешнего магнитного поля в интервале температур от 4.2 до 80 К (эффект Холла), в интервале температур от 4.2 до 300 К (магнитосопротивление) в магнитных полях до 10 Т. Эксперименты были проведены в Атоминституте Венского технологического университета (Вена) и частично в ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» (ЦКП «ИЦ НПМ») Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН».

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показана температурная зависимость поперечного магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$, отражающая значительное различие величины отрицательного магнитосопротивления образцов в связи с сильным влиянием относительного соотношения содержания атомов железа и алюминия в области низких температур. В области температур T ≥ 100 К кривые сближаются, демонстрируя вплоть до комнатной температуры новый эффект высокотемпературного отрицательного магнитосопротивления. Обнаружение такого эффекта, уже не зависящего от соотношения содержания атомов железа и алюминия, также является важным результатом наших экспериментов. Он отражает слабую зависимость высокотемпературного магнитного вклада в сопротивление от величины упорядоченной компоненты намагничения.

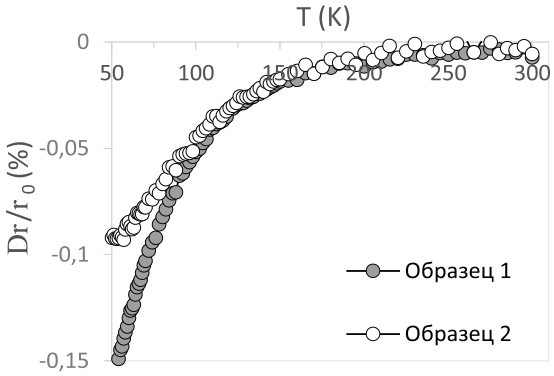

Рис. 1. Высокотемпературное магнитосопротивление $\Delta\rho/\rho_0$ в поле 10 Т для образца 1 ($Fe_{2.1}V_{0.91}Al_{0.99}$) и образца 2 ($Fe_{2.05}V_{0.91}Al_{1.04}$)

В работе [2] при исследовании магнитного состояния сплава Fe-V-Al было обнаружено, что замещение части атомов V атомами Al в решетке сплава Fe_2VAl приводит к ферромагнитному упорядочению с температурой Кюри, близкой к 50 К. Наблюдаемый ферромагнетизм обусловлен спиновой поляризацией носителей тока (дырок), о чем свидетельствует обнаружение аномального эффекта Холла при T = 4,2 К в сплаве, обогащенном алюминием.

В настоящей работе исследовалось влияние вариации состава по содержанию атомов железа и алюминия на эффект Холла и его аномальную компоненту при температурах до 80 К. При этом установлено, что дополнительное обогащение сплава атомами Al приводит к смене знака аномального вклада с отрицательного (образец 1, рис. 2) на положительный (образец 2, рис. 3) при температурах выше 10 К.

Анализ корреляции температурных зависимостей аномального вклада в эффект Холла с величиной поперечного магнитосопротивления ρ_{xx} показал, что при T > 20 К образец 2 ($Fe_{2.05}V_{0.91}Al_{1.04}$) имеет зависимость от ρ_{xx} близкую к линейной, а образец 1 ($Fe_{2.1}V_{0.91}Al_{0.99}$) – к квадратичной, что свидетельствует о различии механизмов аномалий. При этом асимптотики к нулю линейных зависимостей нормальных вкладов эффекта Холла (рис. 2, 3), определяющие максимальные величины аномальных вкладов, дают существенно различающиеся значения этих величин для образцов *1* и *2*, которые отвечают значительно боль-

шим спонтанной намагниченности и степени поляризации носителей тока у сплава 2 ($Fe_{2.05}V_{0.91}Al_{1.04}$), чем у сплава 1 ($Fe_{2.1}V_{0.91}Al_{0.99}$). При $T = 4{,}2$ К упомянутые максимальные вклады сплавов 1 и 2 равны 1,4 и 8 мкОм·см соответственно. Концентрация носителей тока (дырок), согласно измерениям нормального холловского сопротивления, слабо растет при понижении температуры и становится постоянной при $T < 10$ К. Такого рода зависимость характерна для бесщелевого полупроводника со спиновой поляризацией носителей тока [3].

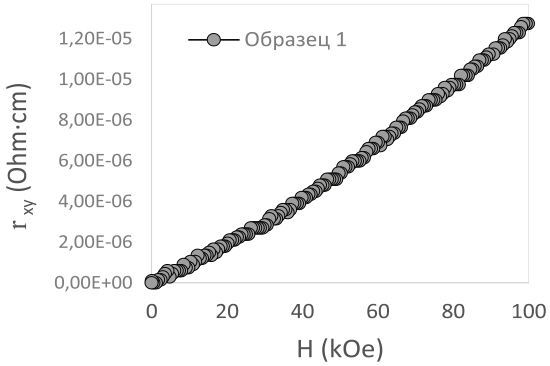

Рис. 2. Зависимость холловского сопротивления ρxy от магнитного поля при T = 80 K для образца 1 ($Fe_{2.1}V_{0.91}Al_{0.99}$)

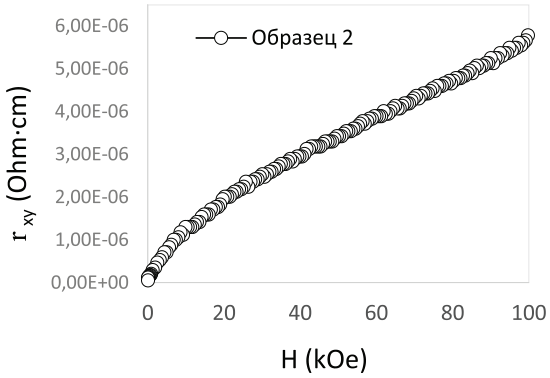

Рис. 3. Зависимость холловского сопротивления ρxy от магнитного поля при T = 80 K для образца 2 ($Fe_{2.05}V_{0.91}Al_{1.04}$)

Заключение

В целом полученные данные служат подтверждением существования вблизи стехиометрического состава сплава резко изменяющейся электронной плотности состояний и сильного рассеяния носителей тока на магнитных неоднородностях. Смещение энергии Ферми в интервал резкого изменения плотности состояний с ростом концентрации поляризующихся по спину носителей тока, добавляемых в сплав атомами непереходного элемента (алюминия), может приводить к увеличению характерной энергии обменного взаимодействия, которое обеспечивает ферромагнитное упорядочение подсистемы атомов железа. Такие представления, нашедшие подтверждения в представленных в данной статье результатах, служат основой для объяснения роли содержания непереходного элемента не только в усилении магнетизма (роста температуры Кюри, проявлений в проводящих свойствах), но и также в аномально сильном влиянии на эффекты, обусловленные рассеянием носителей тока на магнитных дефектах.

Работа выполнена по плановому государственному заданию (тема «Электрон», № 01201463326) при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-17-2-32).

Список литературы

1. Nishino Y. Semiconductorlike Behavior of Electrical Resistivity in Heusler-type Fe2VAl Compound / Nishino Y., Kato M., Asano S., Soda K., Hayasaki M. // Physical Review Letters. – 1997. – Vol. 79. – P. 1909.

2. Lonchakov A.T. Revealing the low-temperature effect of strengthening the magnetism of iron-vanadium-aluminum alloy upon small variation of the non-transition element content in the stoichiometric composition / Lonchakov A.T., Marchenkov V.V., Okulov V.I., Govorkova T.E., Okulova K.A., Bobin S.B., Deryushkin V.V., Emel'yanova S.M., Usik A.Yu., Weber H.W. // Low Temperature Physics. – 2016. – Vol. 42. – P. 230.

3. Bainsla Lakhan. Spin gapless semiconducting behavior in equiatomic quaternary CoFeMnSi Heusler alloy / Bainsla Lakhan, Mallick A.I., Raja M. Manivel, Nigam A.K., Varaprasad B.S.D.Ch.S., Takahashi Y.K., Alam Aftab, Suresh K.G., and Hono K. // Physical Review B. – 2015. – Vol. 91. – P. 104408.