

УДК 621.318.1:538

О. С. Галкина
Ю. М. Боровиков

ТЕРМОЭДС И ТЕРМОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ СПЛАВОВ МЕДЬ — МАРГАНЕЦ

С целью изучения магнитного упорядочения при низких температурах в металлических сплавах, содержащих в немагнитной матрице ионы переходных металлов с локальными магнитными моментами, нами проведены исследования магнитных, электрических и гальваномагнитных свойств медно-марганцевых сплавов [1]. Для получения дополнительных данных о магнитном упорядочении медно-марганцевых сплавов нами проведены исследования термоэдс и термомагнитного эффекта.

Исследовались сплавы марганец — медь с содержанием марганца от 1,15 до 11,37 ат.%. Исходными материалами для сплавов служили электролитически рафинированная медь с содержанием 99,96% меди и марганец с содержанием 99,95% марганца. Термоэдс измерялась потенциометрическим методом с использованием усилителя ФЭОУ-13 (фотоэлектрооптический усилитель). Установка и методика исследования термоэдс описаны в работе [2]. Магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом, измерения проводились в полях до 40 кЭ и температурах от 4,2 до 55 К. Температуры контролировались термопарами медь — константан и медь — золото + 2% кобальта.

Термоэдс. На рис. 1 показана зависимость термоэдс от температуры. Из рисунка видно, что с увеличением концентрации марганца термоэдс падает. Значительное падение термоэдс наблюдается для сплава, содержащего 2,3 ат.% марганца, по отношению к сплаву, содержащему 1,15 ат.% марганца. Для сплавов, содержащих марганца 1,15 и 2,3 ат.% при температурах 13—15 К, наблюдается максимум термоэдс.

На кривых температурной зависимости сопротивления в этом же температурном интервале наблюдается максимум сопротивления. Для сплавов, содержащих марганца 1,15; 2,3; 3,45 ат.%, в интервале температур 20—25 К наблюдается второй максимум термоэдс. В этом же температурном интервале у этих сплавов имеют место минимумы сопротивления [3].

Такое поведение температурной зависимости термоэдс совпадает с теоретическими данными Н. Шула и др. [4]: результаты их расчета для термоэдс показали наличие максимума при температуре Кондо.

Зная величину термоэдс чистой меди [5, 6], мы определили знак примесной термоэдс. Она оказалась положительной в интервале всех измеренных температур для образцов с содержанием марганца 1—3%. Для образцов с содержанием марганца 5,7 и 11,37 ат.% примесная термоэдс отрицательна в интервале температур 10—18 и 10—36 К соответственно для каждого сплава, при более высоких температурах она положительна. Температуры, при которых меняется знак примесной

термоэдс (18 и 36 К) для сплавов с содержанием марганца 5,7 и 11,37 ат.%, совпадают с температурами ферромагнитных переходов в этих сплавах [1].

Так как амплитуду рассеяния на примесном потенциале $3d$ металлов в благородных металлах можно считать положительной ($V > 0$) [7], то знак примесной термоэдс Q однозначно определяется знаком

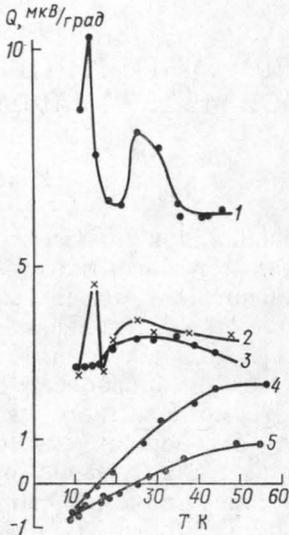


Рис. 1. Температурная зависимость термоэдс QT для сплавов, содержащих различные концентрации Мп в Си: 1—1,15, 2—2,3, 3—3,45, 4—5,7, 5—11,37 ат.%

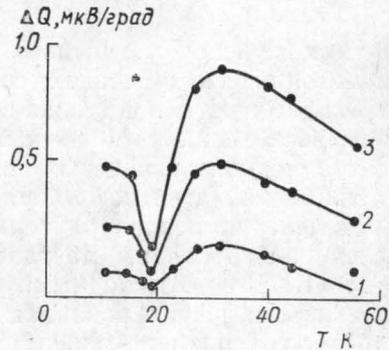


Рис. 2. Температурная зависимость термомагнитного эффекта $\Delta Q(T)_H$ образца, содержащего 5,7 ат. % Мп, в магнитных полях: 1— $H=12,9$, 2— $H=25,7$, 3— $H=38,5$ кЭ

S — d -обменного взаимодействия J (примесная термоэдс $Q \sim JV$ [7—9]). По нашим измерениям, примесная термоэдс положительна во всем интервале измеренных температур для сплавов с содержанием марганца 1—3%, тогда и интеграл S — d -обменного взаимодействия J тоже положителен в этом интервале температур (от 10 до 50 К); S — d -обменное взаимодействие J между электронами проводимости и электронами, локализованными на атоме примеси, состоит из суммы двух взаимодействий: прямого S — d -обмена J_1 и S — d -смешивания J_2

$$J(\mathbf{K}, \mathbf{K}') = J_1(\mathbf{K}, \mathbf{K}') + J_2(\mathbf{K}, \mathbf{K}'),$$

где \mathbf{K} и \mathbf{K}' — волновые векторы различных состояний электрона $J_1 > 0$ при $\mathbf{K} = \mathbf{K}'$ всегда. Предполагается, что $J_2 < 0$ [10—13] и действует как отрицательное обменное взаимодействие [14—15]. По результатам измерения термоэдс $J > 0$ для сплавов с содержанием марганца 1—3% в интервале температур от 10 до 50 К. А так как $J > 0$, когда $|J_1| > |J_2|$, то, видимо, в этих сплавах преобладает прямое S — d -обменное взаимодействие.

Термомагнитный эффект. Термомагнитный эффект — изменение термоэдс в продольном магнитном поле:

$$Q(H, T) - Q(0, T) = \Delta Q(H, T).$$

Для сплавов, содержащих от 2,3 до 11,37 ат.% марганца, ΔQ положительна и растет с увеличением магнитного поля при всех температурах. На кривой температурной зависимости $\Delta Q(T)_H$ наблюдаются максимумы и минимумы (рис. 2) в интервале тех же температур, где наблюдаются минимумы на температурной зависимости $\Delta R/R(T)_H$ и температуры которых совпадают с температурами магнитных превращений CuMn сплавов [1].

Образцы, содержащие марганца меньше 2,3 ат.%, имеют резко отличный характер температурной зависимости $\Delta Q(T)_H$ (рис. 3), чем образцы с содержанием марганца от 2,3 ат.% и выше. Температурные зависимости $\Delta R/R(T)_H$ и $\Delta Q(T)_H$ для образца с содержанием Mn 1,15 ат.% имеют аналогичный характер: начиная с температур 6—10 К до температур 20 К наблюдается резкое падение $\Delta R/R(T)_H$ и $\Delta Q(T)_H$. Выше температуры 20 К уменьшение $\Delta R/R(T)_H$ и $\Delta Q(T)_H$ с повышением температуры становится более плавным. Величина $\Delta Q(T)_H$, кроме того, меняет знак. Температура, при которой происходит изменение знака $\Delta Q(T)_H$, с увеличением магнитного поля повышается. Выше температуры 30 К $\Delta Q(T)_H$ отрицательна для всех полей.

Из работы [1] следует, что сплавы, содержащие марганца меньше 2,3 ат.%, не имеют магнитного упорядочения. Мы отмечали, что сплавы с содержанием марганца выше и ниже 2,3 ат.% имеют различный характер температурной зависимости $\Delta Q(T)_H$. Это, видимо, объясняется наличием или отсутствием магнитного упорядочения в сплавах.

Таким образом, в результате произведенного исследования установлено, что величина термоэдса падает с увеличением концентрации марганца. Максимальную величину термоэдса порядка 11 мкВ/град имеет образец с содержанием марганца 1,15 ат.% и минимальную 1 мкВ/град — образец с содержанием марганца 11,37 ат.%. Термоэдс образца с содержанием марганца 2,3 ат.% в два раза меньше, чем термоэдс для образца с содержанием марганца 1,15 ат.%. Подтверждена теория Н. Шула и Вонга: максимум термоэдса $Q_{\max}(T)$ наблюдается при той же температуре $T=T_K$, где наблюдается минимум сопротивления $\rho_{\min}(T)$ на кривой $\rho(T)$. (Для образцов с содержанием марганца 2,3 и 3,45 ат.% эти температуры равны соответственно $T=T_K=20-25$ К.) Показано, что при температурах, совпадающих с температурами магнитных переходов ~ 18 К для сплава, содержащего марганца 5,7 ат.%, и ~ 36 К для сплава, содержащего марганца 11,37 ат.%, наблюдается изменение знака примесной термоэдса $Q_p(T)$. Определен знак $S-d$ -обменного взаимодействия J для образцов с содержанием марганца 2,3 и 3,45%. Показано, что температуры, при которых наблюдаются аномалии в температурной зависимости термомагнитного эффекта $\Delta Q(T)_H$, совпадают с температурами, где на кривых

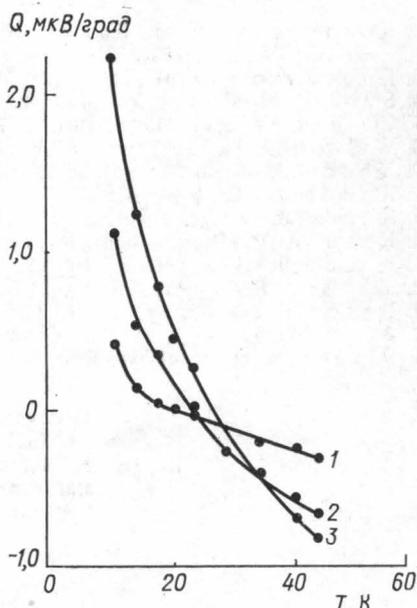


Рис. 3. Температурная зависимость термомагнитного эффекта $\Delta Q(T)_H$ образца, содержащего 1,15 ат.% Mn в магнитных полях: 1— $H=12,9$, 2— $H=25,7$, 3— $H=38,5$ кЭ

$\Delta R/R(T)_H$ и $I_r(T)$ имеются минимумы и максимумы. Эти температуры соответствуют температурам магнитных превращений в этих сплавах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондорский Е. И., Галкина О. С., Боровиков Ю. М. ЖЭТФ, 1971, 61, 1565—1569.
2. Кондорский Е. И., Галкина О. С., Марков П. А., Боровиков Ю. М. ЖЭТФ, 1969, 57, 130—131.
3. Боровиков Ю. М. Канд. дис. М., 1975.
4. Suhl H. et al. «Physics», 1967, 3, 17.
5. Gold A. V. «Phil. Mag.», 1960, 5, 765.
6. Wilson A. H. The Theory of Metals. Cambridge. 1965.
7. Kondo J. «Solid State Physics», 1969, 23, 184.
8. Kondo J. LT9, 1964, B1004.
9. Kondo J. «Progr. Theor. Phys.», 1965, 34, 372.
10. Kasuya T. «Progr. Theor. Phys.», 1956, 16, 45.
11. Kondo J. «Progr. Theor. Phys.», 1962, 28, 846.
12. Watson R. E. «Phys. Rev.», 1965, 139, N1A, A167.
13. Белов К. П., Любутин Н. С. «Письма в ЖЭТФ», 1965, 1, 26.
14. Абрикосов А. А. «Успехи физических наук», 1969, 96, вып. 3.
15. Rivier N. et al. «Phys. Rev. Lett.», 1968, 21, 904.

Поступила в редакцию

1.6 1977 г.

Кафедра
магнетизма