ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.211; 539.233

НАРУШЕНИЕ ПРАВИЛА МУИДЖИ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОМПОЗИТАХ $Co_x(CuO)_{100-x}$ и $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$

А. Б. Грановский, В. А. Ковалев, Х. Р. Кхан*), В. Н. Прудников, М. В. Прудникова

(*кафедра магнетизма*)

Показывается, что правило Муиджи не выполняется для композитов $Co_x(CuO)_{100-x}$ и $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$ с $x > 40$ (в %), а именно сопротивление этих систем при повышении температуры не имеет тенденции к насыщению и достигает значений $300 \div 7000$ мкОм·см, во много раз превышающих $\rho^* \approx 150$ мкОм·см, при этом температурный коэффициент сопротивления остается положительным. Нарушение правила Муиджи в композитах связывается с важной ролью межгранульных контактов в формировании сопротивления.

Известно, что удельное сопротивление ρ кристаллических и аморфных сплавов подчиняется правилу Муиджи [1], согласно которому зависимость $\rho(T)$ становится слабой, если ρ достигает значения $\rho^* \approx 150$ мкОм·см, при этом температурный коэффициент сопротивления положителен при $\rho < \rho^*$ и отрицателен при $\rho > \rho^*$. Существует ряд попыток [2, 3] объяснить природу правила Муиджи, в частности вымораживание температурной зависимости ρ может быть обусловлено малой длиной свободного пробега электронов проводимости. В настоящей работе нарушение правила Муиджи для композитов $Co_x(CuO)_{100-x}$ и $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$ ($x > 40\%$) связывается с важной ролью межгранульных контактов.

Для изготовления образцов композитов $Co_x(CuO)_{100-x}$ и $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$ с содержанием кобальта от 30 до 90 вес.% порошки частиц Co и частиц второй компоненты (CuO или Al_2O_3) с характерным размером, меньшим 20 мкм, смешивались в соответствующей весовой пропорции,

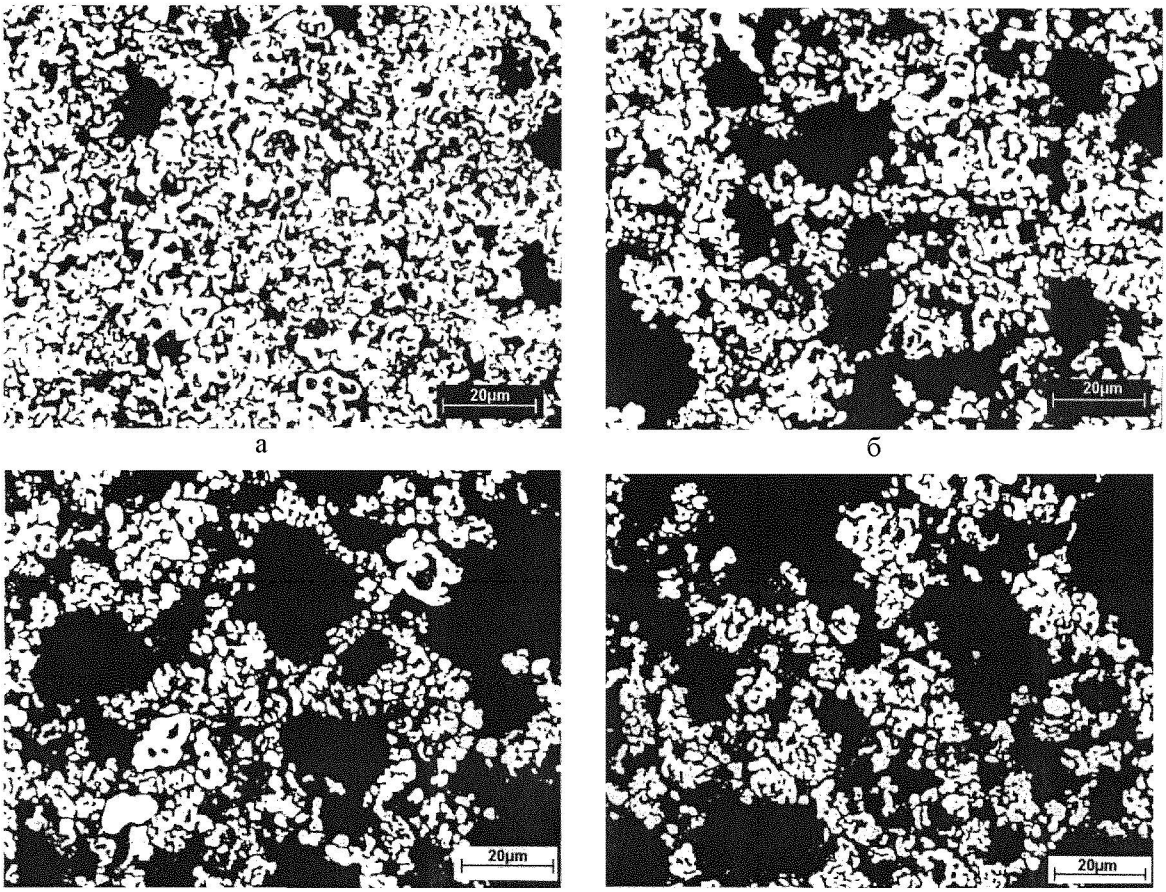

Рис. 1. Микрофотографии композитов $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$: *а* — $Co_{90}(Al_2O_3)_{10}$, *б* — $Co_{80}(Al_2O_3)_{20}$, *в* — $Co_{70}(Al_2O_3)_{30}$, *г* — $Co_{60}(Al_2O_3)_{40}$

*) Институт металловедения, Швабиш Гмюнд, Германия.

прессовались в таблетки (диаметр 15 мм, толщина 2 мм) под нагрузкой 0,8 т, затем отжигались в течение 1 ч в вакууме $\sim 10^{-5}$ мбар при 900°C. Микроструктура полученных образцов исследовалась с помощью оптической (рис. 1) и эмиссионной сканирующей микроскопии, химический и фазовый анализ проведен методом рентгеновской дифракции. Результаты структурных исследований композита $Co_x(CuO)_{100-x}$ подробно описаны в работе [4], а данные для $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$ в целом аналогичны. Образцы состоят из диспергированных в диэлектрической матрице частиц Co различного размера и сложной формы, некоторые из них контактируют между собой, образуя «металлические» пути для прохождения тока.

Сопротивление образцов, вырезанных в виде прямоугольных пластинок толщиной 0,3 мм, измерялось четырехконтактным методом в интервале температур от 77 до 300 К. При уменьшении содержания Co наблюдается переход металл–диэлектрик. Порог перколяции составил $x_p \approx 32$ вес.% для $Co_x(CuO)_{100-x}$ и $x_p \approx 40$ вес.% для $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$. В настоящем сообщении обсуждается поведение $\rho(T)$ только для образцов металлического состава $(x > x_p)$.

Для обеих систем при уменьшении x удельное сопротивление ρ возрастает, а его температурная зависимость не только не «вымораживается», но и становится более резкой (рис. 2, 3).

Наиболее наглядно нарушение правила Муиджи для образца $Co_{50}(Al_2O_3)_{50}$ (рис. 3), для которого ρ линейно зависит от температуры, при комнатной температуре $\rho \approx 7800$ мкОм·см, температурный коэффициент сопротивления всюду положителен и равен $5 \cdot 10^{-3}$ K^{-1}. Увеличение сопротивления $\Delta\rho = \rho(300\ K) - \rho(77\ K)$ оказывается аномально высоким, много больше $\Delta\rho$ чистых металлов и тем более сплавов. Например, для композита $Co_{70}(Al_2O_3)_{30}$ значение $\Delta\rho \approx 70$ мкОм·см, тогда как для Co оно составляет $\Delta\rho \approx 6{,}2$ мкОм·см.

Нарушение правила Муиджи в композитах можно интерпретировать следующим образом. Большое значение сопротивления, а также вид микроструктуры указывают на важную роль контактов между металлическими частицами в формировании «металлических» каналов протекания тока. Согласно Хольму [5], сопротивление одного контакта равно $R = \rho^m/2b$, где ρ^m — удельное сопротивление металла, b — эффективный радиус площадки контактов между гранулами. Следовательно, сопротивление композитов будет в основном определяться размером и микроструктурой площадки контактов между металлическими частицами. При уменьшении содержания кобальта, с одной стороны, роль контактов возрастает и сопротивление композита увеличивается (см. рис. 2, 3); с другой стороны, контактирующие частицы окружаются частицами диэлектрика большего размера, и поэтому при увеличении

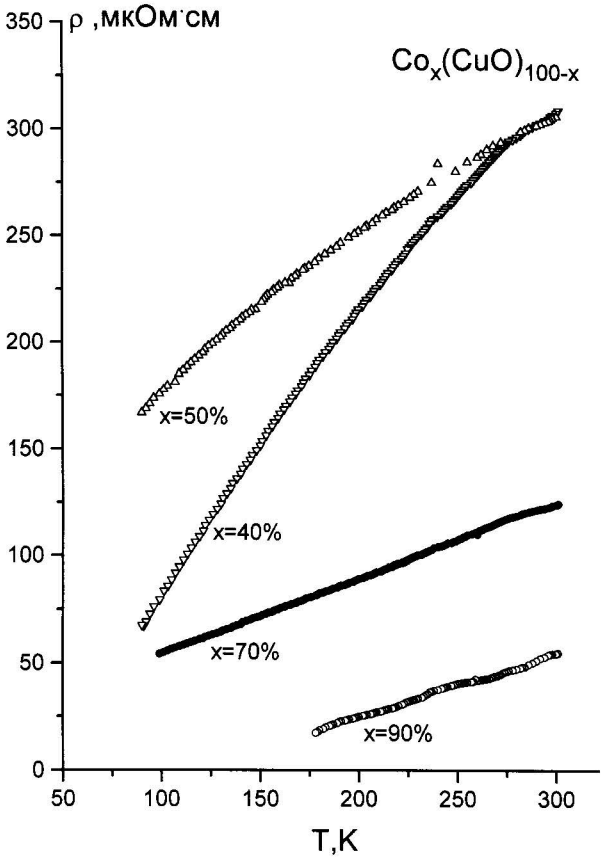

Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления композитов $Co_x(CuO)_{100-x}$

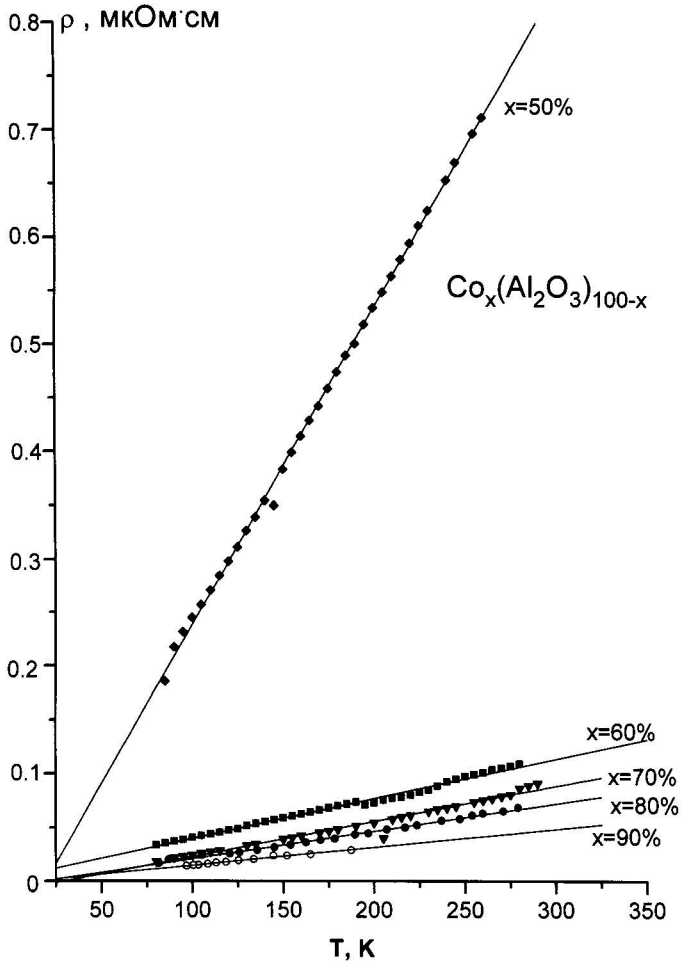

Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления композитов $Co_x(Al_2O_3)_{100-x}$ (экспериментальные точки и проведенные через них линии)

температуры степень их расширения будет меньше. Следовательно, уменьшится размер контактирующих площадок и их эффективный радиус b, что приводит к росту сопротивления композита.

Следует подчеркнуть, что предложенное объяснение носит характер гипотезы и нуждается в дополнительной проверке, хотя тем не менее позволяет непротиворечиво объяснить полученные экспериментальные данные.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 98-02-16806).

Литература

1. *Mooij J.H.* // Phys. State. Solidi. (a). 1973. **17**, No. 2. P. 521.
2. *Laughlin R.B.* // Phys. Rev. 1982. **B26**, No. 6. P. 3479.
3. *Nagel S.* // Adv. Chem. Phys. 1982. **51**. P. 227.
4. *Khan H.R., Granovsky A., Prudnikova M.* et al. // J. Magn. Magn. Mater. 1998. **183**. P. 379.
5. *Holm R.* Electric Contacts Handbook. Berlin–Göttingen–Heidelberg: Springer Verlag, 1958. P. 522.

Поступила в редакцию
02.04.99