

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 539.211; 539.233

НАРУШЕНИЕ ПРАВИЛА МУИДЖИ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОМПОЗИТАХ  $\text{Co}_x(\text{CuO})_{100-x}$  И  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ 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  $\text{Co}_x(\text{CuO})_{100-x}$  и  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$  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  $\rho$  кристаллических и аморфных сплавов подчиняется правилу Муиджи [1], согласно которому зависимость  $\rho(T)$  становится слабой, если  $\rho$  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  $\rho$  может быть обусловлено малой длиной свободно-

го пробега электронов проводимости. В настоящей работе нарушение правила Муиджи для композитов  $\text{Co}_x(\text{CuO})_{100-x}$  и  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$  ( $x > 40\%$ ) связывается с важной ролью межгранульных контактов.

Для изготовления образцов композитов  $\text{Co}_x(\text{CuO})_{100-x}$  и  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$  с содержанием кобальта от 30 до 90 вес.% порошки частиц Co и частиц второй компоненты (CuO или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с характерным размером, меньшим 20 мкм, смешивались в соответствующей весовой пропорции,

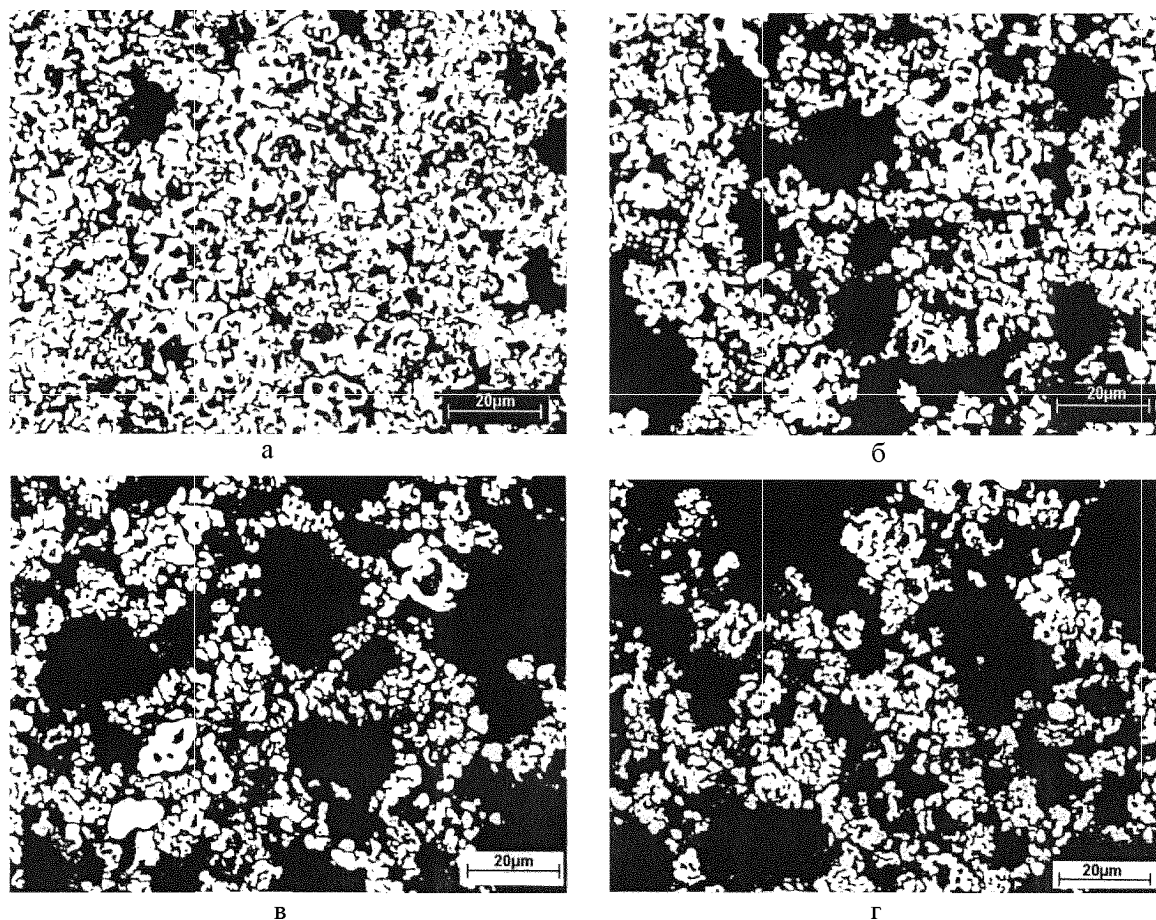


Рис. 1. Микрофотографии композитов  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ : а —  $\text{Co}_{90}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{10}$ , б —  $\text{Co}_{80}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{20}$ , в —  $\text{Co}_{70}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{30}$ , г —  $\text{Co}_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$

\*) 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  $\text{Co}_x(\text{CuO})_{100-x}$  подробно описаны в работе [4], а данные для  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$  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  $\text{Co}_x(\text{CuO})_{100-x}$  и  $x_p \approx 40$  вес.% для  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ . В настоящем сообщении обсуждается поведение  $\rho(T)$  только для образцов металлического состава ( $x > x_p$ ).

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

Наиболее наглядно нарушение правила Муиджи для образца  $\text{Co}_{50}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{50}$  (рис. 3), для которого  $\rho$  линейно зависит от температуры, при комнатной

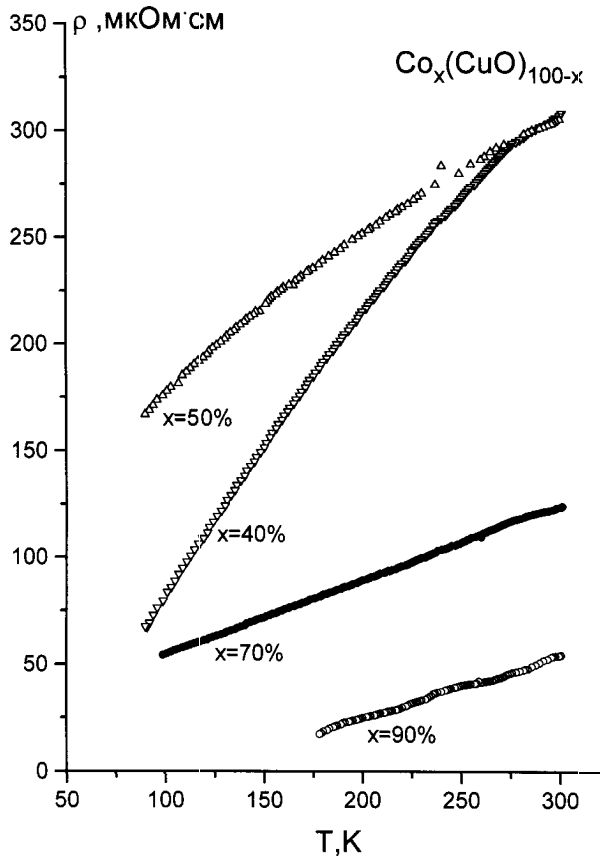


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления композитов  $\text{Co}_x(\text{CuO})_{100-x}$

температуре  $\rho \approx 7800$  мкОм·см, температурный коэффициент сопротивления всюду положителен и равен  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Увеличение сопротивления  $\Delta\rho = \rho(300 \text{ K}) - \rho(77 \text{ K})$  оказывается аномально высоким, много больше  $\Delta\rho$  чистых металлов и тем более сплавов. Например, для композита  $\text{Co}_{70}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{30}$  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  $\rho^m$  — 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

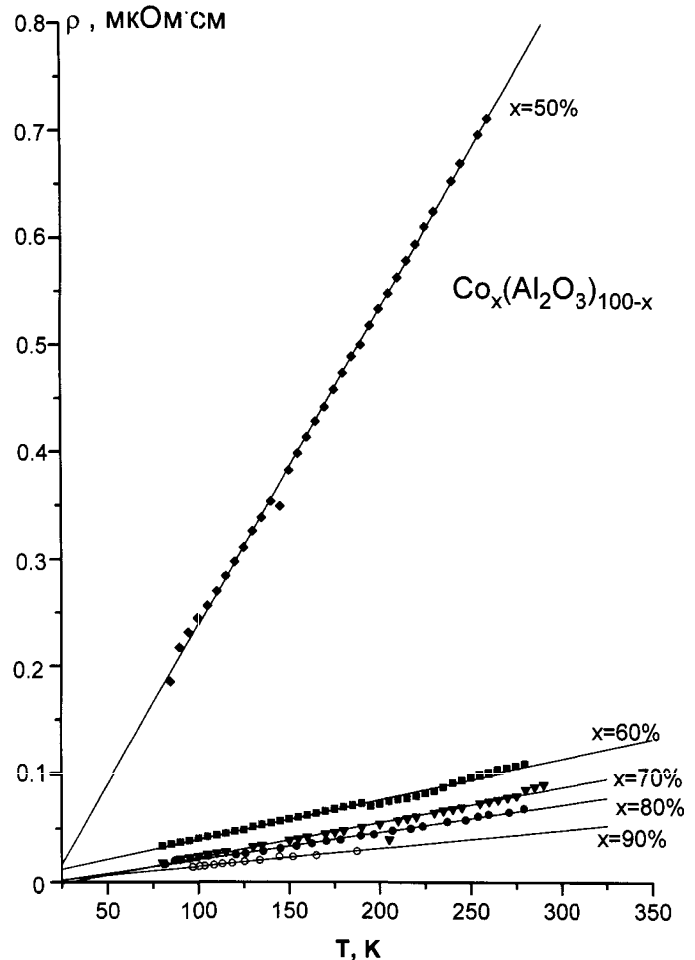


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления композитов  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$  (экспериментальные точки и проведенные через них линии)

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. 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