

## АКТИВАЦИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В СПЛАВАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ТКС

*А.С.Щербаков, А.Ф.Прекул, Р.В.Поморцев*

В закаленных сплавах переходных металлов, проявляющих отрицательный ТКС, обнаружен эффект возрастания величины ТКС с понижением температуры ниже  $\sim 80\text{K}$ . Найдено, что температурная зависимость проводимости сплавов при  $T \lesssim 80\text{K}$  хорошо описывается законом Мотта  $T^{1/4}$ .

Происхождение отрицательного температурного коэффициента сопротивления (ТКС) в сплавах, исходными компонентами которых являются  $d$ -металлы, в настоящее время является предметом широкой дискуссии (см. [1, 2] и ссылки в них). Авторы данной работы предположили [3], что в электронном спектре неравновесных закаленных сплавов образуется псевдощель и что свойства этих сплавов могут быть поняты в терминах модели Мотта [4]. Это предположение получило подтверждение в серии экспериментальных работ (см. [5] и ссылки в ней), где наряду с электросопротивлением были исследованы магнитные, гальваномагнитные и оптические свойства сплавов на основе титана, которые являются типичными представителями рассматриваемой группы материалов.

В настоящей работе мы сообщаем о том, что электропроводность сплавов с отрицательным ТКС часто содержит член, имеющий температурную зависимость вида  $\exp(-B/T^{3/4})$ . Такая температурная зависимость известна как закон Мотта [4] и характерна для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка в неупорядоченных системах.

До сих пор в литературе обсуждался только сам факт возникновения отрицательного ТКС; при этом отмечалось, что зависимости  $\rho(T)$  имеют приблизительно линейный характер. Мы провели тщательное исследование этих зависимостей и обратили внимание на то, что очень часто они оказываются немонотонными. Для анализа электропроводности мы выбрали семь сплавов с отрицательным ТКС с составами: №1 Ti - 9,8 ат.% Mn; №2, 3 Ti - 9,8 ат.% Cr; №4 Ti - 4 ат.% Fe; №5 Ti - 5 ат.% Fe; №6 Ti - 6,5 ат.% Fe; №7 Ti - 8 ат.% Fe закален от 900°C, №8 Ti - 8 ат.% Fe закален от 1000°C. Нумерация графиков на рисунках соответствует этой нумерации сплавов.

На рис. 1 изображены несколько зависимостей  $\rho(T)$ . Предметом обсуждения настоящей работы являются участки кривых  $\rho(T)$ , указанные стрелками, где наблюдается эффект возрастания ТКС с понижением температуры. (Резкий спад сопротивления в области гелиевых температур обусловлен переходом в сверхпроводящее состояние). Мы заостряем внимание на этой особенности по той причине, что существующие теоретические модели для сплавов с отрицательным ТКС (см. [1, 2] и ссылки) предсказывают монотонные зависимости  $\rho(T)$  с насыщением в области низких температур.

Имея в виду результаты ранних исследований [3; 5], мы предположили что обсуждаемый эффект может быть связан с каким-либо активационным вкладом в проводимость сплавов. Однако, как известно, при активационных механизмах проводимости  $\sigma \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow 0\text{K}$ . В то же время, из рис. 1 видно, что трудно представить себе такую экстраполяцию кривых  $\rho(T)$ , при которой сопротивление неограниченно возрастало бы при  $T \rightarrow 0\text{K}$ . Поэтому в качестве интерполяционной формулы для обработки зависимостей  $\sigma(T)$  при  $T \lesssim 80\text{K}$  мы выбрали выражение

$$\sigma(T) = \sigma_0 + A \exp(-B/T^n), \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  - не зависящий от температуры вклад, учитывающий как раз то обстоятельство, что сопротивление остается конечным при  $T \rightarrow 0\text{K}$ .

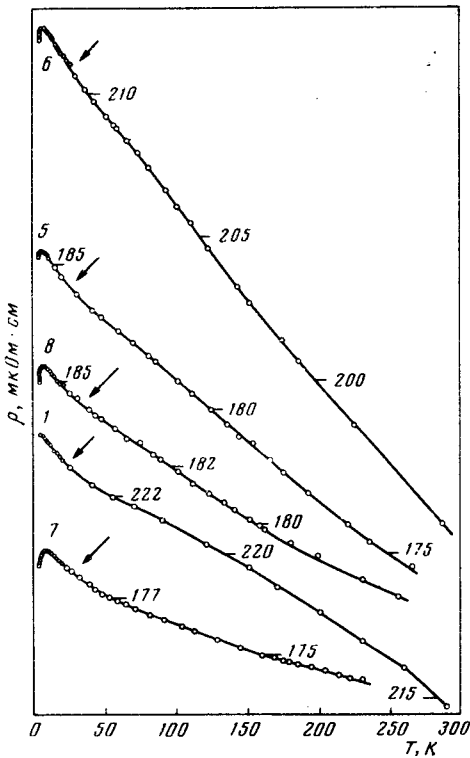


Рис. 1

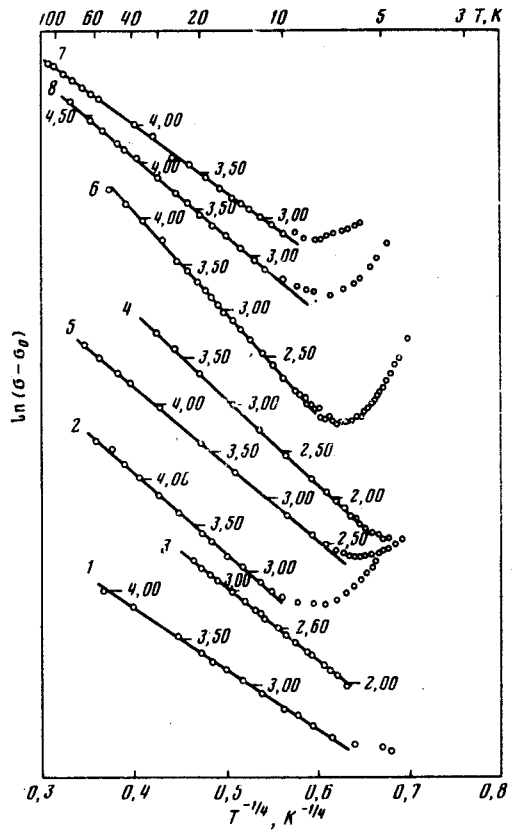


Рис. 2

Для определения величины  $n$  мы использовали стандартную процедуру линеаризации экспериментальных данных в координатах  $\lg \ln(\sigma - \sigma_0)$  от  $\lg T$ , где  $\sigma_0$  является подгоночным параметром. Вычисляя наклон полученных прямых, мы нашли, что во всех случаях  $n = 0,250 \pm 0,003$ . Таким образом, оказалось, что температурозависимая часть проводимости сплавов описывается законом Мотта  $\sigma \sim \exp(-B/T^{1/4})$ .

На рис. 2 изображены зависимости  $\ln(\sigma - \sigma_0)$  от  $T^{-1/4}$ . Видно, что в широком температурном интервале  $\sigma(T)$  сплавов очень хорошо описывается выражением

$$\sigma(T) = \sigma_0 + A \exp(-B/T^{1/4}). \quad (2)$$

Чтобы убедиться в том, что это выражение описывает поведение  $\sigma(T)$  нормального состояния сплавов во всей низкотемпературной области, мы исследовали  $\sigma(T)$  образца  $\text{Ti} - 9,8 \text{ ат.}\% \text{Cr}$  (график 2 рис. 2) в магнитном поле  $H = 130 \text{ кЭ}$ , достаточном для полного подавления сверхпроводимости в этом образце (график 3 рис. 2). Сравнение этих данных показывает, что подавление сверхпроводимости устраняет отклонение экспериментальных значений проводимости от зависимости (2).

Таким образом, введение величины  $\sigma_0$  в качестве аддитивной добавки к закону Мотта дает возможность описать низкотемпературные части кривых  $\sigma(T)$  сплавов с отрицательным ТКС. При этом относительно

ное отклонение величин, вычисленных по формуле (2) от измеренных экспериментально,  $|\sigma^{\text{Выч}} - \sigma^{\text{Изм}}| / \sigma^{\text{Изм}} < 0,01\%$ , т. е. не превышает пределов погрешности измерений. Следовательно, выражение (2) дает практически идеальное описание экстремальных данных в интервале  $0 < T \lesssim 80\text{K}$ .

В то же время, сама структура выражения (2) противоречит существующим представлениям о явлениях переноса в неупорядоченных системах. Действительно, как указал Мотт [4], невозможно одновременное существование локализованных и распространенных состояний при одной и той же энергии. Отсюда следует невозможность сосуществования металлической ( $\sigma_0$ ) и активационной проводимости с переменной длиной прыжка, так как эти механизмы оба обусловлены движением электронов с энергиями, близкими к энергии Ферми.

Возможно, что столь хорошее описание экспериментальных данных выражением (2) является лишь случайностью, и тогда параметры, входящие в (2) — суть случайные числа. Однако, найденные нами значения  $\sigma_0$  одного порядка величины  $4000 - 5000 (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$  и близки к значениям проводимости на металлической стороне андерсоновского перехода. Кроме того, величины радиусов локализации, которые можно оценить из найденных значений "В" в (2) (отвлекаясь от того обстоятельства, что мы имеем дело с областью металлической проводимости) составляют  $5 - 10\text{А}$ , т. е. физически разумные значения.

Таким образом, рассмотренные отдельно оба члена в (2) имеют вполне определенный физический смысл и разумные с физической точки зрения количественные характеристики. Между тем, они не поддаются простой интерпретации как аддитивные вклады в проводимость.

Основные результаты этого сообщения можно сформулировать следующим образом:

1) впервые в температурной зависимости электропроводности сплавов переходных металлов с отрицательным ТКС найден активационный вклад моттовского типа, учет которого позволил с высокой точностью описать эти зависимости.

2) Полученное интерполяционное выражение для  $\sigma(T)$  сплавов может быть указанием на возможность сосуществования металлического и активационного типов проводимости в этой группе материалов. Это является совершенно необычным и может стимулировать дальнейшее развитие теории явлений переноса в неупорядоченных системах.

Авторы благодарят проф. И.М.Цидильковского за ряд полезных стимулирующих дискуссий. Часть работы, связанная с применением магнитного поля, была выполнена в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур, г. Вроцлав, ПНР. Авторы признательны член-корр. АН СССР Н.Е.Алексеевскому и д-ру Ч.Э.Базану за предоставленную возможность проведения этих исследований.

Институт физики металлов  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
18 июля 1980г.

### Литература

[1] Y. Imry. Phys. Rev. Lett., 44, 469, 1980.

[ 2 ] M. Jonson, S. M. Girvin. Phys. Rev. Lett., 43, 1447, 1979.

[ 3 ] А.С. Щербаков, А.Ф.Прекул, Н.В.Волкенштейн. Письма в ЖЭТФ, 26, 703, 1977.

[ 4 ] Н.Ф.Мотт. Переходы металл – изолятор, М., изд. Наука, 1979 г.

[ 5 ] А.С.Щербаков, А.Ф.Прекул, Н.В.Волкенштейн. ФТТ, 22, 2301, 1980.

---