

05.1;05.2;05.3

ОБ АНОМАЛЬНО ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© Г.А.Марков, Н.В.Мельникова, Ю.А.Хон

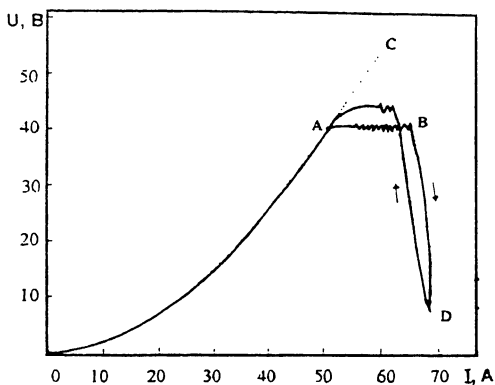
Приведены результаты исследования электросопротивления металлов, подвергнутых сильной пластической деформации, в зависимости от плотности тока. Показано, что при плотностях электрического тока, превышающих некоторое критическое значение, проводимость материала начинает возрастать и становится аномально высокой. Предложен механизм аномально высокой проводимости, объясняющий основные экспериментальные результаты.

Известно, что проводимость металлических систем растет с понижением температуры и ниже критической для сверхпроводников обращается в бесконечность. При температурах фазовых превращений наблюдаются аномалии проводимости в виде скачков и изломов. Повышение плотности дефектов приводит к некоторому понижению проводимости, не изменяя качественно самой зависимости от температуры.

Указанные закономерности характерны, вообще говоря, для случая, когда электрическое поле не меняет структуру материала, то есть он находится в состоянии вблизи термодинамического равновесия. Если предварительно сильным внешним воздействием, например пластической деформацией, перевести материал в состояние, далекое от равновесия (по терминологии [1]-сильновозбужденное), свойства материала могут радикально меняться. Если напряженность электрического поля достаточно велика, чтобы вызвать смещения атомов из узлов решетки, то проводимость такого сильнодеформированного проводника может стать аномально высокой.

По-видимому, впервые это явление было обнаружено экспериментально в [2], но работ, посвященных объяснению данного явления, мы не нашли. В связи с этим ниже проведено обсуждение основных экспериментальных результатов по переходу деформированных материалов в состояние с аномально высокой проводимостью с позиции сильновозбужденных состояний в кристаллах.

Рассмотрим вначале основные экспериментальные данные. В качестве примера на рисунке приведена типичная вольтамперная зависимость для деформированного волочком проводника диаметром 76 мкм из вольфрама технической чистоты при возрастании и убывании тока в течение



Вольтамперная зависимость для вольфрама в состоянии с аномально высокой проводимостью.

~ 10 с. Степень вытяжки материала превышала 98%. Деформированная проволока герметизировалась в стеклянной ампуле, заполненной аргоном. Источником питания служил стабилизатор тока. Вольтамперные характеристики записывались двухкоординатным самописцем ENDIM-2. Измерения проводились как при постоянном токе, так и в импульсном режиме с длительностью импульса треугольной формы $\tau = 0.1$ с.

Отклонение U от линейной зависимости на кривой OA связано с нагреванием проводника и увеличением его сопротивления. Пунктирная кривая AC соответствует зависимости напряжения от тока для слабо деформированного материала. На участке AB при увеличении тока напряжение существенно не меняется, что соответствует уменьшению сопротивления. На участке BD происходит резкое падение сопротивления при незначительном возрастании тока. В точке D сопротивление становится примерно в 3 раза ниже, чем при комнатной температуре. При дальнейшем увеличении тока сопротивление стремится к нулю. При обратном уменьшении тока происходит возврат в точку A, но уже по другой кривой. Длина участка AB зависит от материала и степени его деформации.

Плотность тока j в точке A имеет значение $\sim 10^9$ А/м². Температура проводника при этом составляет ~ 3000 К. При снижении сопротивления на участке ABD температура проводника уменьшается. К снижению температуры проводника в точке перехода A приводит и возрастание величины j_0/τ , j_0 — амплитуда импульса тока.

Увеличение степени деформации качественно зависимость напряжения от тока не меняет, но приводит к сниже-

нию плотности тока в точке Аи соответственно температуры проводника. Одновременное увеличение степени деформации и j_0/τ позволяют снизить температуру проводника в точке перехода до температур, близким к комнатным.

Таким образом, основными величинами, определяющими переход в состояние с аномально высокой проводимостью, являются степень деформации образца, определяющей уровень внутренних напряжений, плотность тока и длительность импульса тока. Следует особо подчеркнуть, что нагрев проводника за счет внешнего источника приводит к отжигу дефектов и делает переход в состояние с аномально высокой проводимостью невозможным.

Если при пропускании тока происходит быстрая релаксация внутренних напряжений в результате нагрева, то переход в состояние с аномально высокой проводимостью не происходит. Данная ситуация имеет место в меди, для которой удалось только уменьшить сопротивление приблизительно в три раза по сравнению с исходным в указанных условиях эксперимента.

Следует подчеркнуть, что состояние с аномально высокой проводимостью принципиально отличается от сверхпроводящего, реализующегося при температурах и токах, меньших критических значений, как переход в основное состояние. В рассматриваемом случае материал не находится в основном состоянии, и механизмы аномально высокой проводимости следует искать в особенностях структурного состояния сильнодеформированного кристалла.

Вблизи основного состояния плотность электрического тока и напряженность поля E связаны известным соотношением

$$j_0 = \sigma_0 E, \quad (1)$$

где σ_0 — проводимость, падающая с повышением температуры. Ее уменьшение связано с рассеянием электрона на колебаниях решетки и дефектах структуры.

Процесс пластической деформации связан с переходом кристалла в сильно возбужденное состояние [1], в котором часть атомов характеризуется векторами смещений u_h , не совпадающими с упругими. В дальнейшем сильно возбужденное состояние распадается с образованием дефектов кристаллической структуры. При высокой плотности дефектов внутренние напряжения приводят к смещениям u_d , близким к u_h .

Под действием электрического поля атомы смещаются в прежние состояния u_d . Переход атома в новое положение в кристаллической решетке связан с поглощением энергии. В этих условиях становится возможным образование электро-солитона [3]. При этом проводимость материала $\sigma_h \rightarrow \infty$.

Образующаяся при волочении текстура и высокая напряженность электрического поля делают его движение квазиодномерным. Именно это и необходимо для существования электросолитона.

В результате на тех участках проводника общей длиной δl , где проводимость бесконечна, падение напряжения становится равным нулю. На оставшейся длине напряжение продолжает расти до тех пор, пока снова не обратится в нуль. Вследствие этого формируется характерная зубчатая структура на участке АВ (см. рисунок). Его длина определяется степенью деформации материала. Чем выше степень деформации, тем на большей длине проводника падение напряжения одновременно обращается в нуль. Участок АВ вследствие этого становится короче. Именно это и наблюдается экспериментально. Когда на всей длине проводника проводимость обращается в бесконечность, напряжение падает до нуля по кривой ВD. При уменьшении тока напряжения в проводнике отличаются от тех, которые были при возрастании тока. Поэтому возвращение в точку А происходит по другой кривой.

Авторы выражают благодарность фирме "WENSAR Holding AG" за поддержку работы.

Список литературы

- [1] Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Савушкин Е.В., Хон Ю.А. Изв. вузов, Физика. 1987. Т. 30 (1). С. 9.
- [2] Марков Г.А. Патент РФ № 18267444 от 13.10.1992 г.
- [3] Давыдов А.С. В кн. "Нелинейные волны. Распространение и взаимодействие". М.: Наука, 1981.

Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН

Поступило в Редакцию
26 мая 1996 г.