

*Краткие сообщения*

## Влияние пластической деформации на низкотемпературный минимум термоэдс меди

В.Н. Светлов

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: svetlov@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 23 июня 2011 г., после переработки 7 октября 2011 г.

Изучено влияние пластической деформации на термоэдс и электросопротивление поликристаллической меди при низких температурах. Основное внимание уделено минимуму термоэдс, локализованному вблизи 15 К, и его трансформациям при пластической деформации порядка и меньше 100%. Результаты этих исследований дадут возможность глубже понять механизмы рассеяния электронов в металлах с дефектами.

Вивчено вплив пластичної деформації на термоерс і електроопір полікристалічної міді при низьких температурах. Основну увагу приділено мінімуму термоерс, локалізованому поблизу 15 К, та його трансформаціям при пластичній деформації порядку і менше 100%. Результати цих досліджень дадуть можливість глибше зрозуміти механізми розсіювання електронів в металах з дефектами.

PACS: 72.15.-v Электронная проводимость в металлах и сплавах;  
72.15.Eb Электрическая и тепловая проводимости в кристаллических металлах и сплавах;  
62.20.F- Деформация и пластичность.

Ключевые слова: термоэлектродвижущая сила, дислокации, пластическая деформация, электросопротивление.

Известно [1], что при пластической деформации можно сильно измельчить структуру металлов вплоть до микроструктур. Исследование механизмов деформационного зарождения и развития микроструктур особенно актуально в связи с тем, что не существует общепринятой точки зрения на эту проблему [2], которая имеет фундаментальный характер и касается малоизученных механизмов пластического деформирования.

Один из методов исследования пластических деформаций основан на измерении термоэлектродвижущей силы (ТЭДС). В работе [3] наблюдали особенность в поведении ТЭДС меди, которая заключалась в смене знака абсолютной ТЭДС меди при  $\sim 40$  К и резко выраженном минимуме при  $\sim 10$  К. Кроме того, авторы [3] отмечали, что эффект холодной прокатки наиболее существен именно в области этого минимума и мало заметен при более высоких температурах.

В настоящей работе изучено влияние холодной прокатки на поведение минимума ТЭДС меди в образцах различной чистоты, при различных степенях деформации при одновременном измерении электросопротивления, которое также зависит от деформационных процессов в образцах.

В экспериментах по измерению ТЭДС использована методика, развитая в работах [4,5]. Измеряемые образцы представляли собой поликристаллическую проволоку диаметром  $\sim 1,5$  мм. В одних случаях из чистой меди (99,99%) — в дальнейшем условно «чистые» образцы, а в других из обычной электротехнической меди М1 — в дальнейшем условно «грязные», следующего химического состава, %: Cu — 99,9; Bi — 0,001; Sb — 0,002; As — 0,002; Fe — 0,005; Ni — 0,002; Pb — 0,005; Sn — 0,002; S — 0,004; O — 0,055; Zn — 0,004. Образцы прокатывали при комнатной температуре со все увеличивающейся степенью деформации, после

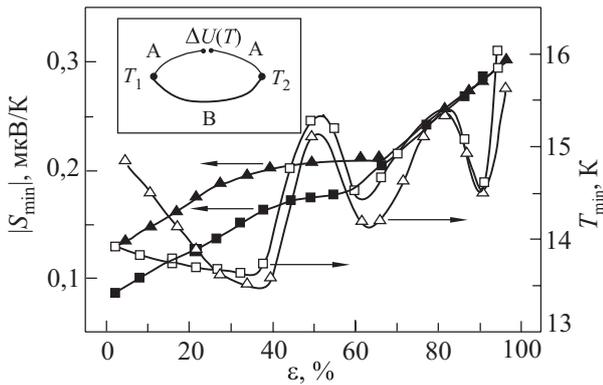


Рис. 1. Зависимости модуля величины минимума абсолютной ТЭДС  $|S_{\min}|$  ( $\blacktriangle, \blacksquare$ ) и положения минимума на температурной шкале  $T_{\min}$  ( $\triangle, \square$ ) от степени деформации  $\epsilon$  для «чистых» (треугольники) и «грязных» (квадраты) образцов. На вставке — схема измерения ТЭДС.

каждой прокатки отжигали при температуре  $\sim 0,1T_m$  в течение 1 ч для удаления точечных дефектов, а затем в них измеряли ТЭДС и электросопротивление в интервале температур 4,2–300 К.

На вставке рис. 1 приведена схема измерения ТЭДС образца, которая представляет собой дифференциальную термопару. Таким образом измеряли разностную дифференциальную ТЭДС  $S_{AB}(T)$ . Для определения абсолютной ТЭДС образца (участок В) измеряли абсолютную ТЭДС подводящих проводов (участок А). Для этого на участке В использован сверхпроводник (ВТСП керамика с  $T_c = 90$  К). Известно, что абсолютная ТЭДС сверхпроводника равна нулю, таким образом, в данной схеме можно измерить абсолютную

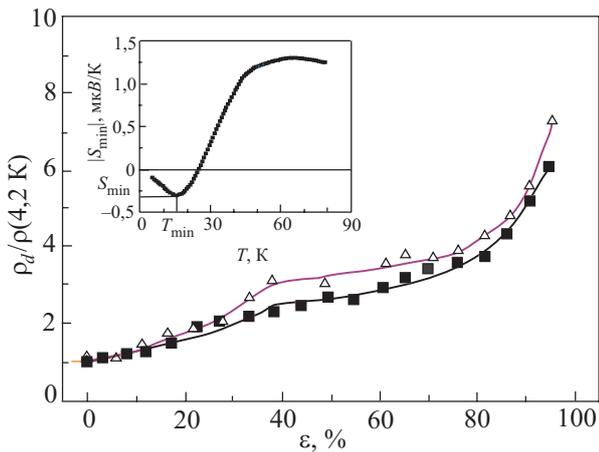


Рис. 2. Зависимости удельного электросопротивления после деформации  $\rho_d$ , нормированного на удельное сопротивление недеформированного образца  $\rho$ , измеренные при  $T = 4,2$  К от степени деформации  $\epsilon$  для «чистых» (треугольники) и «грязных» (квадраты) образцов. На вставке приведена зависимость абсолютной ТЭДС чистой меди при определенной степени деформации.

ТЭДС подводящих проводов  $S_A$  вплоть до температуры  $\sim 90$  К. Поскольку  $S_{AB} = S_B - S_A$ , легко получить абсолютную ТЭДС измеряемых образцов  $S_B$ .

Для примера на вставке рис. 2 представлена зависимость абсолютной ТЭДС чистой меди при определенной степени деформации. Обозначим величину минимума  $S_{\min}$ , а его положение на температурной шкале  $T_{\min}$ . В дальнейшем будем следить за поведением величин  $S_{\min}$  и  $T_{\min}$  в зависимости от степени деформации.

На рис. 1 показана зависимость модуля величины минимума абсолютной ТЭДС  $|S_{\min}|$  и положения минимума на температурной шкале  $T_{\min}$  от степени деформации  $\epsilon$  как для «чистых», так и для «грязных» образцов. На рис. 2 приведена зависимость удельного электросопротивления после деформации  $\rho_d$ , нормированного на удельное сопротивление недеформированного образца  $\rho$ , измеренные при  $T = 4,2$  К для тех же степеней деформации.

На зависимости  $|S_{\min}|(\epsilon)$  наблюдаются два четко выраженных кроссовера: при  $\epsilon \sim 40\%$  и  $\epsilon \sim 70\%$ . Таким образом, до  $\sim 40\%$  деформации  $|S_{\min}|$  плавно увеличивается, выходя на плато в районе от  $\epsilon \sim 40\%$  до  $\sim 70\%$ , а затем вновь резко увеличивается. Такое поведение характерно как для «чистых», так и для «грязных» образцов. Однако по абсолютной величине  $|S_{\min}|$  в «грязных» образцах меньше вплоть до  $\epsilon \sim 70\%$ . То, что в слаболегированных сплавах величина минимума на ТЭДС меньше по сравнению с чистым исходным материалом, отмечалось и в работе [3]. На рис. 1 видно, что после  $\epsilon \sim 70\%$  поведение «чистых» и «грязных» образцов практически одинаково. Это говорит о том, что влияние дефектов, образующихся при пластической деформации, превышает влияние примеси при слабом легировании и оба образца ведут себя уже как «грязные».

Сравнивая поведение электросопротивления от деформации на рис. 2 с зависимостью  $|S_{\min}|(\epsilon)$  на рис. 1, можно обнаружить корреляцию в поведении этих величин. Легко увидеть, что наблюдается такой же диапазон до  $\epsilon \sim 40\%$ , где электросопротивление плавно увеличивается, примерно такой же диапазон, близкий к плато, от  $\epsilon \sim 40\%$  до  $\sim 70\%$  и затем резкое увеличение сопротивления. Таким образом, величина  $|S_{\min}|$  связана с процессами рассеяния электронов так же, как и электросопротивление.

Давно известно [6] как минимум о трехстадийном характере пластической деформации. Причиной стадийности пластического течения являются изменения в дислокационной структуре. К настоящему времени сложилась определенная классификация типов дислокационных структур (субструктур), наблюдаемых в металлах. Дислокационные субструктуры по мере увеличения деформации возникают не случайным образом, а в определенной последовательности [6]. Каждая субструктура появляется при достижении определенной, критической плотности дислокаций. Переход от

одной дислокационной субструктуры к другой приводит к значительному, иногда весьма резкому, изменению механических и электрических свойств металлов.

Как минимум три области, последовательно сменяющие друг друга, можно увидеть и на рис. 1 и 2: до  $\varepsilon \sim 40\%$ ; от  $\varepsilon \sim 40\%$  до  $\sim 70\%$ ; при  $\varepsilon > 70\%$ . Такое поведение, как мы полагаем, вполне может быть связано со стадийностью пластического деформирования и последовательностью дислокационных превращений. Для более убедительного подтверждения этой точки зрения необходимо снять деформационную кривую для данных образцов.

Зависимость поведения  $T_{\min}$  от деформации имеет ярко выраженный периодический характер, который так же коррелирует с нашими тремя областями.

Таким образом, впервые обнаружена корреляция между поведением  $|S_{\min}|$  абсолютной ТЭДС меди при низких температурах и поведением электросопротивления при одних и тех же степенях деформации, что может свидетельствовать об одинаковом влиянии механизмов рассеяния электронов на эти величины.

Впервые также обнаружена периодическая зависимость положения минимума  $S_{\min}$  на температурной шкале  $T_{\min}$ , что связывается нами с эволюцией дислокационных субструктур при пластической деформации. К сожалению, природа взаимосвязи превращений дислокационной субструктуры с другими процессами, происходящими в поликристаллах, изучена недостаточно. И это определяет важность исследования закономерностей эволюции дислокационных подсистем металлических материалов электрофизическими методами. К точному и детальному пониманию этого вопроса должны привести накопление достоверных экспериментальных данных и применение для решения этой задачи методов теоретической физики.

Автор выражает благодарность К.А. Чишко и В.Б. Степанову за полезные обсуждения.

1. Р.З. Валиев, И.В. Александров, *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией*, Логос, Москва (2000).
2. M.A. Meyers, A. Mishra, and D.J. Benson, *Progr. Mater. Sci.* **51**, 427 (2006).
3. R.H. Kropschot and F.J. Blatt, *Phys. Rev.* **116**, 617 (1959).
4. В.М. Дмитриев, Н.Н. Пренцлау, В.Н. Светлов, В.Б. Степанов, *ФНТ* **31**, 94 (2005) [*Low Temp. Phys.* **31**, 73 (2005)].
5. В.Н. Светлов, В.Б. Степанов, *ФНТ* **32**, 919 (2006) [*Low Temp. Phys.* **32**, 700 (2006)].
6. Н.А. Конева, Э.В. Козлов, *Изв. высших учебн. заведений. Физика* **2**, 89 (1990).

## The effect of plastic deformation on the behavior of low-temperature minimum of thermopower of copper

V.N. Svetlov

The effect of plastic deformation on thermopower and electric resistance of polycrystalline copper was investigated at low temperatures. The main attention was concentrated on the thermopower minimum localized at  $T \sim 15$  K and its transformations in the course of plastic deformation of the order of 100% or lower. The results obtained will enable the mechanisms of electron scattering in metals with defects to be understood more fundamentally.

PACS: **72.15.-v** Electronic conduction in metals and alloys;  
**72.15.Eb** Electrical and thermal conduction in crystalline metals and alloys;  
**62.20.F-** Deformation and plasticity.

Keywords: thermopower, dislocation, plastic deformation, electric resistance.