

Влияние пластической деформации на температурную зависимость термоэдс в меди

В.Н. Светлов, В.Б. Степанов

*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 22 ноября 2005 г.

При низких температурах экспериментально обнаружен сдвиг минимума на температурной зависимости термоэлектродвижущей силы, возникающий при пластической деформации меди и связанный с дислокационной и примесной структурой деформированного образца. Для оценки температурного интервала, в котором дислокационный вклад является преобладающим, экспериментальные результаты сравниваются с имеющимися в литературе теоретическими расчетами.

При низких температурах экспериментально виявлено зсування мінімуму на температурній залежності термоелектрорушійної сили, що виникає при пластичній деформації міді й пов'язано з дислокаційною та домішковою структурою деформованого зразка. Для оцінки температурного інтервалу, у якому дислокаційний внесок є переважним, експериментальні результати порівнюються з наявними в літературі теоретичними розрахунками.

PACS: 72.15.-v, 72.15.Eb, 62.20.Fe

Ключевые слова: термоэлектродвижущая сила, дислокации, пластическая деформация.

Введение

Известно, что свойства реальных металлов при низких температурах в значительной мере определяются наличием дефектов кристаллической структуры, их типом и плотностью. Поэтому влияние дефектов на свойства металлов является одной из основных проблем физики твердого тела как в плане теоретического обоснования, так и в связи с разработкой экспериментальных методов исследований. Очень чувствительным, хотя малоизученным, является метод исследования с помощью измерения термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), которая зависит в основном от температуры, свойств поверхности Ферми металла и характера рассеяния электронов на примесях и дефектах решетки.

В отличие от электропроводности ρ ТЭДС реагирует на искажения кристаллической решетки не только величиной, но и знаком эффекта. Как отмечалось в работах [1,2], в литературе крайне мало экспериментальных данных о влиянии определенного вида дефектов и, в частности, дислокаций на

ТЭДС. Тем более нам неизвестны работы, где как-то оценивалось изменение термоэдс, обусловленное взаимодействием дислокаций с примесями.

В настоящей работе мы, по-видимому, впервые обнаружили сдвиг минимума на температурной зависимости ТЭДС, обусловленный спецификой взаимодействия дислокаций с примесями в пластически деформируемом образце.

При температурах $T \leq T_D/20$, где T_D — температура Дебая, когда можно пренебречь тепловым рассеянием электронов на фононах по сравнению с рассеянием на примесях и дефектах решетки, из измерений ТЭДС в пластически деформированных образцах можно получить сведения о характере рассеяния электронов на таких дефектах, как дислокации.

Техника эксперимента

В эксперименте использована методика, развитая нами в работе [3].

Измеряемые образцы представляли собой в одних случаях поликристаллическую проволоку из

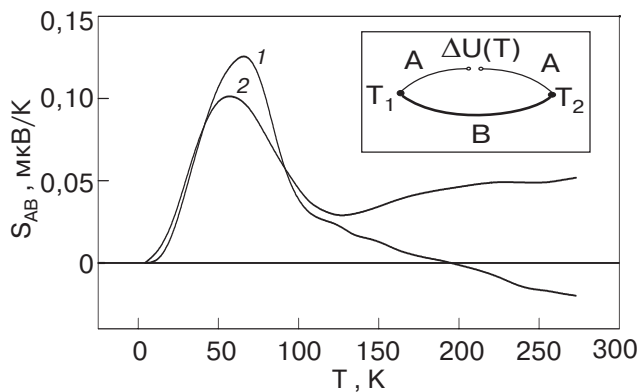


Рис. 1. Зависимость разностной дифференциальной термоэдс S_{AB} от температуры для недеформированных «чистых» (1) и «грязных» (2) образцов. На вставке схема образца для измерения термоэдс.

меди марки МОО, отожженную при температуре $T \sim 0,7T_m$, где T_m — температура плавления, в других случаях — проволоку из обычной электротехнической меди марки МОБ, отожженную при тех же температурах.

На вставке рис. 1. приведена схема измеряемого образца, который представляет собой дифференциальную термопару. Участки А представляют собой электротехническую проволоку с отношением $\rho^{300}/\rho^{4,2} = 115$ и являются неизменными подводящими проводами. Участок В — это в одних случаях «чистая» проволока марки МОО с отношением сопротивлений $\rho^{300}/\rho^{4,2} = 281$, в других — электротехническая «грязная» проволока с $\rho^{300}/\rho^{4,2} = 85$. В наших экспериментах обе проволоки деформировали одинаковым способом — прокаткой. При этом обе проволоки «чистая» и «грязная» одинакового диаметра ($\sim 1,5$ мм) прокатывались до полосы толщиной $\sim 0,2$ мм. Переходы от металла А к металлу В оказались по сути эквивалентными контактам между разнородными металлами в обычной термопаре.

При определении ТЭДС выводы проволоки А находились при одинаковой (комнатной) температуре, а переходы к участку В — при температурах T_1 и T_2 (см. вставку рис. 1). При этом температура T_1 поддерживалась постоянной ($T_1 = 4,2$ К), а температура T_2 изменялась от гелиевой до комнатной.

Напряжение $\Delta U(T) = \int_{T_1}^T (S_B - S_A) dT$ и является

интегральной ТЭДС. Разностную дифференциальную ТЭДС определяли как $S_{AB} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} (\Delta U / \Delta T)$. Отсюда легко получить, что $S_{AB} = S_B - S_A$, где S_B и S_A — абсолютные или удельные ТЭДС металлов В и А.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены разностные дифференциальные термоэдс S_{AB} от температуры для случаев, когда металлом В (см. вставку на рис. 1) была «чистая» и «грязная» недеформированные проволоки. Кривая 1 на рис. 1 демонстрирует случай, когда металлом В была «чистая» проволока. Кривая 2 соответствует случаю, когда на месте металла В была «грязная» проволока. Следует иметь в виду, что эти кривые получаются дифференцированием экспериментальных кривых, какими являются $\Delta U(T)$ или интегральная ТЭДС, и методика получения которых описана в работе [3].

Видно, что в районе низких температур от 4,2 до ~ 50 К кривые 1 и 2, монотонно возрастая, мало отличаются друг от друга. Однако после одинаковой деформации образцов прокаткой кривые резко меняют свою форму и сдвигаются относительно друг друга (см. рис. 2). Кривая 1 (рис. 2) соответствует деформации «чистой» проволоки, а кривая 2 на этом рисунке описывает поведение деформированной «грязной» проволоки. При этом положение максимумов на кривых 1 и 2 (рис. 2) практически не изменилось и соответствует их положению на рис. 1. Однако обращает на себя внимание появление минимумов на этих кривых в области низких температур, которые связаны, как мы полагаем, с возникновением дислокаций в образцах при пластической деформации и особенностями механизмов рассеяния электронов на дислокациях.

Аналогичный минимум на грязном деформируемом материале наблюдали в работе [3]. Однако в настоящей работе мы имеем возможность сравнить температурное поведение ТЭДС в «чистом» и «грязном» материалах до и после прокатки. Как уже упоминалось, пластическая деформация как «чистого», так и «грязного» образцов приводит к возникнове-

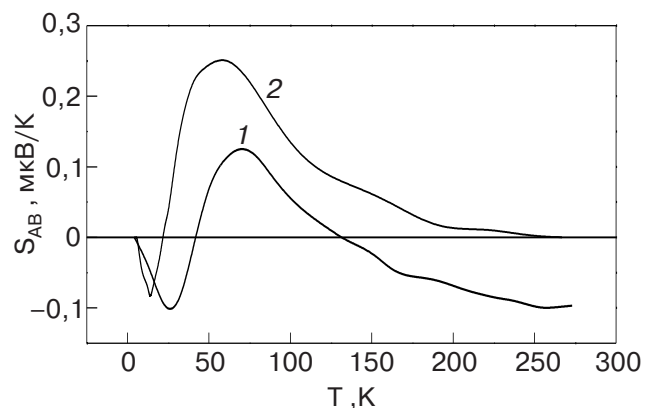


Рис. 2. Зависимость разностной дифференциальной термоэдс от температуры для деформированных «чистых» (1) и «грязных» (2) образцов.

нию низкотемпературного минимума на зависимостях S_{AB} . При этом минимум на «грязном» образце имеет меньшую (примерно на 20%) амплитуду по сравнению с минимумом на «чистом» образце. В то же время минимум на «грязном» образце оказывается существенно более низкотемпературным ($T_{\min} \sim 13$ К) по сравнению с «чистым» ($T_{\min} \sim 25$ К).

Деформация приводит также к модификации температурных зависимостей S_{AB} и в области высоких температур (100–300 К).

Возвращаясь к низкотемпературной области, следует заметить, что, как отмечалось во Введении, это примерно тот интервал температур, где можно пренебречь тепловым рассеянием электронов на фононах по сравнению с рассеянием на примесях и дефектах решетки. В то же время эксперименты по измерению ρ показали, что электропроводность наших образцов в этой области температур практически не изменяется, плавно выходя при $T \sim 35$ К на полочку остаточного сопротивления. Мы полагаем, что это связано с меньшей чувствительностью ρ по сравнению с ТЭДС.

Остановимся более подробно на вопросе, с чем может быть связано уменьшение и смещение минимума на рис. 2 в более «грязных» материалах. Вероятной причиной уменьшения минимума может быть увеличение плотности дефектов (дислокации плюс примеси), что приводит к уменьшению длины свободного пробега фононов и, следовательно, к снижению эффективности механизма электрон-фононного взаимодействия.

Что касается смещения минимума, то, как известно, взаимодействие точечных дефектов с дислокациями может носить и характер взаимного притяжения. При этом, если при своем движении примеси, диффундирующие в кристалле, встретят на своем пути дислокацию, то она будет играть роль ловушки и будет захватывать движущиеся атомы, стремясь включить их в свою, так называемую атмосферу. Иными словами это означает увеличение времени оседлой жизни атома примеси вблизи дислокации. Возможен и другой вариант, когда встретившаяся атому примеси дислокация ориентирована вдоль диффузионного потока. Так как в ядре дислокации есть области, где промежутки между атомами исходного металла расширены, то примесный атом попадает в область облегченной диффузии, «дислокационной трубки», где диффундирующие примесные атомы легко просачиваются по каналу с нарушенным порядком укладки атомов основного металла. В любом случае взаимодействие дислокаций с примесями имеет важные последствия, так как при этом меняются свойства самих дислокаций и, в частности,

уменьшается их подвижность, а также характер рассеяния электронов.

Таким образом, можно предположить, что наличие примесей может приводить к дополнительному закреплению дислокаций и уменьшению длины дислокационных сегментов, которые колеблются подобно упругим струнам в вязкой среде. В результате собственная частота сегментов увеличивается, поэтому дислокационные фононы имеют большую энергию, и должен наблюдаться сдвиг в область более высоких температур.

Однако в наших экспериментах наблюдается сдвиг минимума в область более низких температур. В этом случае можно объяснить это смещение влиянием примесей на свойства частотного спектра колебаний дислокаций и проявляющихся в появлении щели в частотном спектре и пика спектральной плотности вблизи нее [4]. Это влияние, безусловно, отразится на характере рассеяния электронов на дислокациях. Для оценки температуры, ниже которой такое влияние может стать преобладающим, сначала оценим плотность дислокаций ρ_N . Воспользуемся тем, что в поликристаллах меди изменение удельного электросопротивления ρ , обусловленное дислокациями, увеличивается пропорционально их плотности. Поэтому, используя коэффициенты пропорциональности, приведенные в работе [5] для различных металлов, в нашем случае получим $\rho_N \leq 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Тогда из работы [4] следует, что искомая температура совпадает по порядку величины с той, при которой наблюдаются наши особенности.

Безусловно, для более точного сравнения теории и эксперимента необходимо в дальнейшем исследовать этот эффект как от типа, так и от количества примесей.

Выводы

Можно утверждать, что в настоящей работе впервые на температурной зависимости разностной дифференциальной термоэдс наблюдался сдвиг минимума, связанный с взаимодействием дислокаций с примесями. Этот минимум на кривой в области температур 25–30 К сдвигался в область более низких температур ~10–13 К. Вероятно, этот сдвиг связан с влиянием примесей на свойства частотного спектра колебаний дислокаций.

Дальнейшие исследования, как мы полагаем, позволят сравнить этот эффект в различных металлах при разных концентрациях примесей.

В заключение авторы благодарны К.А. Чижко и С.Н. Смирнову за полезные обсуждения.

1. А. С. Каролик, А. А. Лухвич, В. И. Шарандо, *ФММ* **98**, 25 (2004).
2. А.А. Лухвич, в кн.: *Влияние дефектов на электрические свойства металлов*, Наука и техника, Минск (1976).
3. В.М. Дмитриев, Н.Н. Пренцлау, В.Н. Светлов, В.Б. Степанов, *ФНТ* **31**, 94 (2005).
4. В.Д. Нацик, С.Н. Смирнов, *ФНТ* **14**, 172 (1988).
5. L.M. Clarebrough, M.E. Hargreaves, and M.H. Loretto, *Phillos. Mag.* **6**, 807 (1961).

The influence of plastic deformation
on temperature dependence of thermal e.m.f.
in copper

V.N. Svetlov and V.B. Stepanov

A displacement of the minimum in the temperature dependence of thermal electromotive force is revealed experimentally at low temperatures. The displacement appears when copper is subjected to plastic deformation and is connected with the dislocation and impurity structure of the deformed sample. To estimate the temperature interval in which the dislocation contribution is dominant, the experimental results are compared with the theoretical calculations available in literature.

Keywords: thermal electromotive force, dislocations, plastic deformation.