

## НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ДВОЙНИКОВАНИИ НИОБИЯ

*В. С. Бобров, М. А. Лебедкин*

Сообщается о наблюдении импульсных электрических сигналов при низкотемпературном двойниковании ниобия. Обнаруженное явление может быть связано с эффектом увлечения электронов проводимости.

В работе<sup>1</sup> была рассмотрена задача об увлечении электронов проводимости направленным потоком дислокаций, что должно приводить к возникновению электрического тока или, при разомкнутой цепи, разности потенциалов  $\Delta\varphi$  на гранях образца. Как показывают оценки<sup>1</sup>, для наблюдения этого эффекта необходимо реализовать направленные потоки дислокаций высокой плотности. Для металлов, используя результаты и приближения<sup>1</sup>, оценку  $\Delta\varphi$  можно записать в виде:

$$\Delta\varphi \sim \frac{\Delta^2 d}{4\epsilon\mu v_f k} \dot{\epsilon} \quad (1)$$

( $\mu$  и  $\Delta$  – химический и деформационный потенциалы,  $e$  и  $v_f$  – заряд и фермиевская скорость электронов,  $d$  – размер образца в направлении движения потока дислокаций с плотностью  $\rho_m$  и скоростью  $V$ ,  $\dot{\epsilon} = \kappa\rho_m b V$  – скорость деформации,  $b$  – вектор Бюргерса,  $\kappa$  – ориентационный множитель). Для типичных значений параметров ( $\Delta \sim \mu \sim 1$  эВ,  $v_f \sim 10^8$  см/с,  $d \sim 1$  см и  $\kappa \sim 1$ ) имеем численную оценку:  $\Delta\varphi \sim 10^{-8}$  эВ, т. е. для получения  $\Delta\varphi \gtrsim 1$  мкВ необходимы скорости  $\dot{\epsilon} \gtrsim 10^2$  с<sup>-1</sup>. Такие высокие значения  $\dot{\epsilon}$  в условиях стационарного деформирования трудно достижимы, они сопровождались бы нагревом и быстрым разрушением образцов. Возникают также трудности с созданием направленного потока дислокаций. Существуют, однако, материалы, деформация которых протекает скачкообразно, и во время скачков нагрузки кратковременно достигаются высокие значения  $\dot{\epsilon}$ . Это особенно ярко проявляется в условиях деформационного двойникования. Например, как показали исследования<sup>2</sup>, при низкотемпературном двойниковании ниобия движение двойниковых прослоек и соответствующих скоплений двойникующих дислокаций происходит со скоростью  $\sim 10^5$  см/с, в моменты скачков нагрузки (рис. 1) достигаются  $\dot{\epsilon} \gtrsim 10^3$  с<sup>-1</sup>.

Этот материал и был выбран для поиска предсказанного эффекта.

Образцы вырезались из монокристаллов ниобия на электроискровом станке в форме параллелепипедов ( $4 \times 4 \times 12$  мм<sup>3</sup>) с осью вблизи направления типа <110>. Для размещения электрических контактов на них с помощью надрезов вдоль противоположных ребер отгибались тонкие "усы" длиной около 5 мм. Линия, соединяющая основания "усов", соответствовала ориентации плоскости двойникования типа {112}. У основания одного из "усов" делался надрез ( $\approx 0,5$  мм) для того, чтобы обеспечить движение двойников в направлении другого контакта. Образцы механически шлифовались, химически полировались и отжигались ( $T \approx 1000$  К,  $p \approx 10^{-4}$  Па). Деформация образцов осуществлялась сжатием со скоростью 100 мкм/мин в диапазоне  $T = 4,2 \div 15$  К. Для регистрации электрических сигналов использовались запоминающий осциллограф С8-12 с высокочувствительным блоком усиления Я40-1103 и система предварительного усиления ( $K_{yc} \approx 40$  в диапазоне 50  $\div$  200 кГц), состоящая из трансформатора и промежуточного усилителя с низким уровнем шумов. Деформируемые образцы и трансформатор с подводящими проводами находились внутри толстостенного сверхпроводящего цилиндра, экранирующего от наводок.

С помощью использованной измерительной системы в моменты скачков нагрузки при двойниковании деформируемых образцов ниобия (рис. 1) регистрировались импульсные электрические сигналы различной формы, амплитуды и длительности, примеры которых представлены на рис. 2. Величина и длительность фронта нарастания сигналов зависели от глубины скачков нагрузки. На рис. 3 представлены предварительные данные по зависимос-

ти амплитуды усиленных сигналов  $\Delta\varphi_3$  от приращения деформации  $\Delta\epsilon$  в моменты скачков нагрузки. При деформировании одного из образцов измерялась амплитуда сигналов, имеющих наиболее простую форму (например, рис. 2, *a* и *b*). Наблюдаемые сигналы имели определенную полярность. В отдельных опытах после серии скачков нагрузки наблюдалась смена полярности регистрируемых импульсов (например, рис. 2, *a* и *b*), что, по-видимому, связано с истощением двойникования в области надреза и сменой направления движения двойников. Это подтверждается визуальным наблюдением двух систем двойникования после деформации соответствующих образцов.

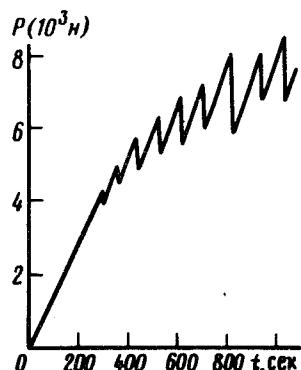


Рис. 1. Пример кривой деформации при двойниковании ниобия, деформируемого при 4,2К со скоростью 100 мкм/мин ( $P$  – нагрузка,  $t$  – время)

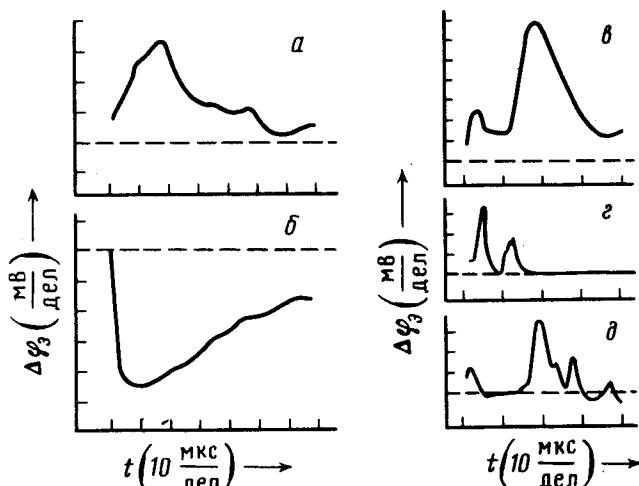


Рис.2.

Рис. 2. Примеры осциллограмм усиленных электрических сигналов, регистрируемых в моменты скачков нагрузки при двойниковании ниобия (*a* и *b* – сигналы для одного из образцов в моменты 5-го и 16-го скачков нагрузки; *c* – *d* примеры сигналов различной формы)

Были проведены контрольные опыты по проверке влияния возможных наводок на величину и форму регистрируемых импульсов. Сигналы наблюдались только при двойниковании. Они не зависели от режима работы деформирующего устройства, условий изоляции от него торцов деформируемых образцов и отсутствовали при механических колебаниях нагружающего устройства, не связанных с двойникованием. Не было обнаружено влияния магнитного поля Земли на величину регистрируемых импульсов. При отсутствии сверхпроводящего экрана наблюдались обычные импульсные сигналы, которые сопровождались высокочастотными колебаниями из-за вибраций после скачков нагрузки подводящих проводов первичной обмотки трансформатора в поле Земли.

Низкотемпературное двойникование сопровождается импульсным нагревом образцов<sup>2</sup>. В связи с этим была проведена проверка роли термоэдс. Первичная обмотка трансформатора изготавливается из тонкого ниобиевого провода, контакты типа ниобий – ниобий размещались на удаленных от образцов концах "усов". При импульсном нагреве одного из контактов термоэдс не регистрировалась. В отдельных опытах использовался трансформатор с первичной обмоткой из медного провода. Величина регистрируемых импульсов с точностью до отличия в коэффициенте усиления при этом не менялась. О нетепловой природе наблюдаемых сигналов свидетельствуют также их разнообразная форма, смена полярности и длительность фронта нарастания импульсов ( $\tau \sim 1 \div 10 \text{ мкс}$ ), которая примерно совпадает с оценками времени двойникования по результатам измерений с помощью пьезодатчиков и значительно меньше времени распространения в образцах теплового фронта ( $\sim 10^{-4} \div 10^{-3} \text{ с}$ )<sup>2</sup>.

Передний фронт импульсов связан с кинетикой двойникования (задний фронт, по-видимому, определяется затуханием тока в системе образец – трансформатор после "выключения" действовавшей ЭДС<sup>3</sup>). Используя значения  $\tau$ , оценим скорость деформации в моменты скачков нагрузки  $\dot{\epsilon} \sim \Delta\epsilon/\tau \sim 10^3 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$  для  $\Delta\epsilon \sim 10^{-2}$ . Затем, воспользовавшись (1), получим оценку разности потенциалов при увлечении электронов потоком дислокаций в условиях двойникования  $\Delta\varphi \sim 10 \div 100 \text{ мкВ}$ , а для усиленных сигналов:  $\Delta\varphi_3 \approx K_{yc} \Delta\varphi \sim 0,4 \div 4 \text{ мВ}$ . Представленные на рис. 2 и 3 результаты свидетельствуют об удовлетворительном согласии экспериментальных данных с оценками, следующими из теории<sup>1</sup>.

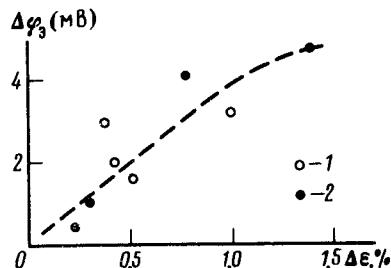


Рис. 3. Зависимость амплитуды  $\Delta\varphi_3$  усиленных электрических импульсов от приращения деформации  $\Delta\epsilon$  при двойникении (1 –  $T < T_c$ , S-состояние, 2 –  $T > T_c$ , N-состояние)

Из результатов, представленных на рис. 3, видно, что при деформировании образцов в нормальном и сверхпроводящем состояниях регистрируются электрические импульсы примерно одинаковой амплитуды. Это, по-видимому, связано с тем, что движение двойников и соответствующих дислокационных скоплений с высокими скоростями сопровождается разрушением куперовских пар<sup>4</sup> и вовлечением возбужденных электронов в дрейфовое движение, а электрическое сопротивление системы трансформатор – образец в диапазоне частот, соответствующих длительности регистрируемых импульсов, определяется индуктивным сопротивлением и не зависит от состояния (S или N) образца и первичной обмотки.

Сложная форма импульсов (рис. 2, в, г, д) может быть обусловлена спецификой зарождения и движения двойниковых прослоек во время скачков нагрузки. В этом смысле регистрируемые сигналы позволяют судить о характере и динамике процессов двойникования.

Совокупность приведенных данных и оценок позволяет полагать, что в проведенных опытах удалось зарегистрировать увлечение электронов при движении двойников. Эффект увлечения электронов является прямым проявлением электрон-дислокационного взаимодействия. Наряду с опытами по влиянию сверхпроводящих переходов на пластическое течение (например,<sup>5-7</sup>), обнаруженное явление служит новым подтверждением существующих теоретических представлений<sup>1, 4</sup>. Изучение эффекта увлечения дает возможность оценить параметры теории и представляется нам перспективным для исследования движения и рождения "сителей деформации".

Авторы благодарят В.Я.Кравченко и Ю.А.Осипьяна за внимание к работе и обсуждение результатов, В.Н.Копылова и В.В.Коршунова за методические советы и помощь, С.С.Шевага за помощь в эксперименте.

#### Литература

1. Кравченко В.Я. ФТТ, 1967, 9, 1050.
2. Баранова Г.К., Бобров В.С., Копецкий Ч.В., Сальников Г.И. ЖЭТФ, 1979, 77, 257.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
4. Каганов М.И., Кравченко В.Я., Нацик В.Д. УФН, 1973, 111, 655.
5. Пустовалов В.В., Старцев В.И., Фоменко В.С. ФТТ, 1969, 11, 1382.
6. Бобров В.С., Гутманас Э.Ю. Письма в ЖЭТФ, 1973, 17, 137; Phys. Stat. Sol., 1972, (B) 54, 413.
7. Бобров В.С. ФТТ, 1974, 16, 3375; Physica, 1981, 107B, 721.