

УДК 539.37+538.98

©1993

АНИЗОТРОПИЯ И ПОЛЯРНОСТЬ ЭФФЕКТА УВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ ДВОЙНИКОВАНИИ НИОБИЯ

В.С.Бобров, М.А.Лебёдкин

Обнаружены анизотропия и полярность электрических откликов при низкотемпературном деформационном двойниковании ниобия. На основании анализа данных в рамках представлений об электрон-дислокационном взаимодействии сделан вывод о связи этих откликов с эффектом увлечения электронов проводимости носителями деформации. Представлены данные, свидетельствующие о возможности использования этого явления для изучения динамических деформационных процессов.

В [1] сообщалось о наблюдении электрических импульсов на гранях деформируемых образцов в условиях деформационного двойникования монокристаллов Nb. Было высказано предположение, что регистрируемые импульсы связаны с предсказанным в [2] эффектом увлечения электронов проводимости потоком дислокаций. Впоследствии этот эффект исследовался в условиях двойникования и дислокационного скольжения при скачкообразной деформации ряда металлов [3-8]. В настоящей работе сообщается о наблюдении полярности и анизотропии эффекта при увлечении электронов двойниками в Nb. Экспериментальные данные сопоставляются с оценками теории. Демонстрируется возможность использования методики регистрации электрических откликов для изучения динамических деформационных процессов.

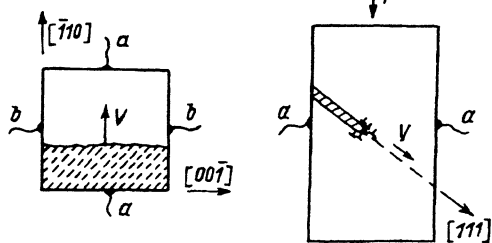
1. Методика

Монокристаллические образцы Nb ($R_{300}/R_{4.2} \cong 150 \div 200$) с ориентацией оси, близкой к одному из направлений $\langle 110 \rangle$, вырезались на электроискровом станке в форме параллелепипедов ($4 \times 4 \times 10$ мм), механически шлифовались, химически полировались и отжигались в вакууме (700°C , 10^{-6} Торр). Ориентация боковых граней образцов выбиралась так, чтобы одна из них была параллельна направлению двойникования $\langle 111 \rangle$. Образцы деформировались сжатием со скоростью 100 мкм/мин в диапазоне $T \cong 1.5 \div 50$ К.

Регистрация электрических импульсов проводилась с помощью методики, аналогичной [1,8]. Измерительная аппаратура обеспечивала регистрацию импульсов с временем нарастания переходных характеристик около 0.3 мкс. Нижняя граница полосы пропускания (≈ 100 Гц - 1 МГц)

Рис. 1. Схема расположения контактов на гранях образца ниобия (вид сверху и сбоку)

aa и bb — расположение контактов вдоль и перпендикулярно направлению двойникования $\langle 111 \rangle$.



определялась дифференцированием сигналов трансформатором, входящим в измерительную схему для согласования сопротивления низкоомного источника напряжения (образца) и предусилителя. Соединительные провода от первичной обмотки трансформатора размещались на тонких «усах», отогнутых от образцов [1,8], или приваривались точечной сваркой непосредственно к образцам. Использовалось расположение контактов, при котором соединяющая их линия с точностью до $3-4^\circ$ была параллельна или перпендикулярна направлению сдвига при двойниковании (рис. 1). В отдельных опытах вблизи одного из контактов с помощью надреза создавался концентратор напряжения. В этом случае удавалось наблюдать локализацию следов сдвига в виде пакета параллельных двойниковых прослоек, выходящих из области надреза.

2. Результаты и обсуждение

Низкотемпературная деформация исследованных кристаллов Nb определялась преимущественно процессами деформационного двойникования и протекала скачкообразно (рис. 2,а). Металлографические исследования показали, что каждый скачок нагрузки сопровождается образованием системы двойниковых прослоек [9]. При этом на гранях деформируемых образцов регистрируются серии электрических импульсов с длительностью $\langle \tau \rangle \sim 2 \div 3$ мкс и продолжительностью серий 0.1–1 мс (рис. 2,б–г) [3–7]. Анализ следов сдвига на поверхности образцов показал, что число двойниковых прослоек, образующихся при одном скачке нагрузки, приблизительно совпадает с количеством импульсов в серии, регистрируемой при данном скачке. Это позволяет полагать, что каждый импульс возникает при движении отдельной двойниковой прослойки, а при наложении эффектов, связанных с квазиодновременным движением нескольких прослоек, импульсы имеют сложную структуру.

Рассмотрим эти электрические отклики с точки зрения эффекта увлечения электронов [2]. Передавая электронам проводимости часть своего импульса, двойники могут вовлекать их в дрейфовое движение. Из условия электронейтральности сила, увлекающая электроны, должна компенсироваться возникновением электрического поля и, следовательно, разности потенциалов соответствующего знака на гранях образца. Распределение электрического потенциала должно отражать анизотропию движения дефектов. Наблюдение полярности и анизотропии эффекта относительно направления двойникования могло бы служить подтверждением этих представлений.

Полярность эффекта наблюдалась в опытах, когда при первых скачках нагрузки из области надреза (концентратора напряжений) вблизи

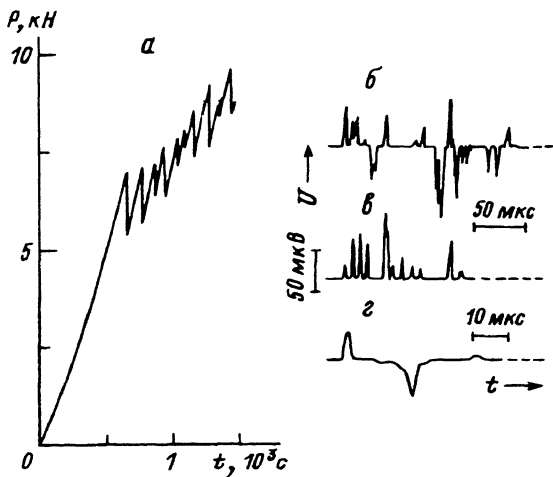


Рис. 2. Примеры кривой деформации при сжатии ($\dot{S} = 100$ мкм/мин, $T \approx 4.2$ К) монокристалла образца Nb ($\langle 110 \rangle$) (а), серий электрических импульсов (б, е), регистрируемых в моменты скачков нагрузки при расположении контактов параллельно направлению двойникования, и первых импульсов серии при более детальном временном разрешении (з).

P — нагрузка, U — электрическое напряжение, t — время.

одного из контактов происходило движение пакета параллельных двойниковых прослоек. В этом случае регистрировались серии импульсов преимущественно одной полярности (например, рис. 2, б), знак которой соответствовал переносу электронов в направлении движения двойников. Для наблюдения анизотропии электрических откликов были проведены опыты с использованием расположения контактов вдоль и поперек направления двойникования в специально ориентированных образцах (рис. 1). В первом случае при образовании в моменты скачков нагрузки системы пересекающихся двойников регистрировались серии импульсов разного знака (например, рис. 2, а и 3, а). На контактах, расположенных перпендикулярно направлению двойникования, при том же уровне чувствительности регистрировались лишь отдельные импульсы, причем их амплитуда U_i была значительно ниже, чем при параллельном расположении контактов (рис. 3, б).

На рис. 4 приведены зависимости суммарной амплитуды серий импульсов $U_{\Sigma} = \sum |U_i|$ от приращения деформации $\Delta \epsilon$ при отдельных скачках нагрузки. При расположении контактов в направлении двойникования U_{Σ} и $\Delta \epsilon$ связаны соотношением $U_{\Sigma} \approx \alpha \Delta \epsilon$, где $\alpha \approx 70$ мВ (оценка по методу наименьших квадратов; разброс данных обусловлен, например, распределением двойников относительно контактов и различием в динамике их движения). При перпендикулярном расположении контактов

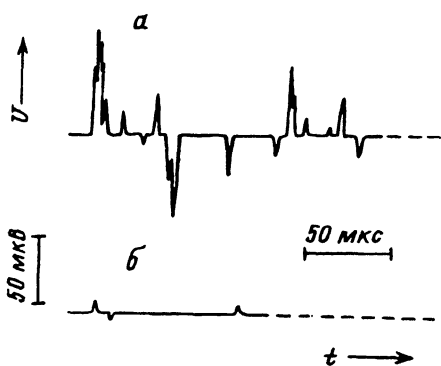


Рис. 3. Примеры электрических импульсов, регистрируемых вдоль (а) и перпендикулярно (б) направлению двойникования при близких значениях глубины скачков нагрузки.

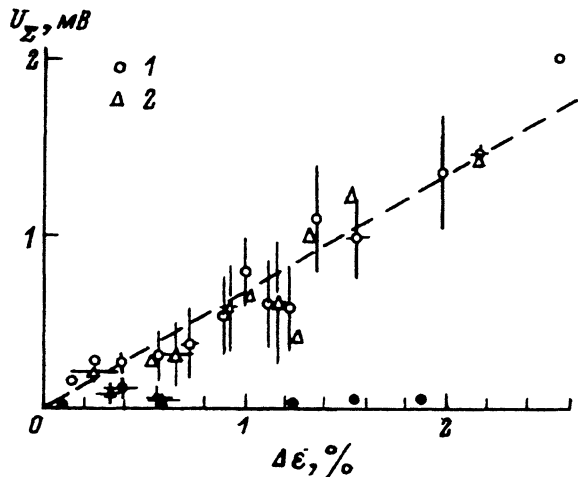


Рис. 4. Зависимость суммарной амплитуды U_{Σ} от приращения деформации $\Delta\epsilon$ при скачках нагрузки для серий импульсов, регистрируемых вдоль (светлые точки) и перпендикулярно (темные точки) направлению двойникования.

1 — 4.2 К; 2 — разные температуры деформации, $T \approx 1.5 \div 50$ К. Штриховая линия — обработка данных по методу наименьших квадратов ($U = \beta\Delta\epsilon$, $\beta \approx 70$ мВ).

U_{Σ} заметно ниже ($U_{\Sigma}^{\parallel}/U_{\Sigma}^{\perp} \leq 5\%$ при $\Delta\epsilon \geq 1.5\%$) и практически не зависит от $\Delta\epsilon$. Приведенные данные свидетельствуют о преимущественном электронном переносе в направлении, соответствующем кристаллографии движения двойников. Анизотропия электрических откликов отражает анизотропию двойникования.

Анизотропия и полярность электрических импульсов позволяют более определенно связать их с эффектом увлечения электронов проводимости в направлении движения двойников. Рассматривая двойникование как синхронное движение двойникующих частичных дислокаций [10,11], проведем сопоставление данных с численными оценками теории [2] для направленного потока дислокаций. Для этого аналогично [1,8] воспользуемся соотношением

$$U \sim \frac{\kappa \Delta^2 d}{4\pi n v_f \mu} \dot{\epsilon}_p \approx \beta \dot{\epsilon}_p, \quad (1)$$

где Δ и μ — деформационный и химический потенциалы; e , v_f и n — заряд, фермиевская скорость и концентрация электронов; d и κ — размер образца и ориентационный множитель; $\dot{\epsilon}_p$ — скорость пластического течения при направленном движении дефектов. Амплитуду отдельных импульсов можно связать с максимальным значением $\dot{\epsilon}_p$ при движении отдельного двойника $U \sim \beta \dot{\epsilon}_{\max}$. Аппроксимируя форму импульсов треугольной ($\dot{\epsilon}_{\max} \approx 2(\dot{\epsilon}) \approx 2\delta\epsilon/\tau$), запишем

$$U_i \sim 2\beta \dot{\epsilon}_{\max} \approx 2\beta(\delta\epsilon_i/\tau_i), \quad (2)$$

$$U_{\Sigma} \sim 2\beta \Sigma \delta\epsilon_i/\tau_i \approx 2\beta \Delta\epsilon/\langle\tau\rangle, \quad (3)$$

где $\delta\epsilon_i$ — приращение деформации, связанное с отдельным двойником; τ_i и $\langle\tau\rangle$ — длительность отдельного импульса и средняя длительность импульсов в сериях. Зависимости (1) и (3) качественно согласуются с данными на рис. 4 (U_{Σ} пропорционально $\Delta\epsilon$ и не зависит от T в диапазоне 1.5–50 К). Отметим, что амплитуда U_i отдельных импульсов серий не чувствительна к нагреву образцов [9] в моменты скачков нагрузки, что

также соответствует оценке (1), в которой не содержатся параметры, явно зависящие от температуры.

Для количественного сопоставления экспериментальных данных и результатов теории [2] воспользуемся приближением почти свободных электронов ($dn/d\mu \simeq (3/2)(n/\mu)$) и значениями $\mu \simeq 5.3 \text{ эВ}$, $v_f \simeq 1.2 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ для Nb [12], предположим также $\Delta \sim \mu$. Тогда получим оценку коэффициента $\alpha \simeq 2\beta/\langle\tau\rangle \approx 15 \text{ мВ}$. Учитывая, что теория [2] дает оценку эффекта увлечения электронов с точностью до порядка величины, можно считать, что эта оценка удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением $\alpha \simeq 70 \text{ мВ}$. Наблюдаемое расхождение экспериментальных и теоретических данных может быть связано с особенностями электронной структуры реальных металлов и с отличием характера движения дефектов от модельной ситуации. В частности, для переходных металлов характерна высокая плотность электронных состояний вблизи уровня Ферми [12]. Это может привести к увеличению оценки α примерно на порядок. Далее в [2] использовались представления о непрерывном потоке дислокаций, равномерно распределенных по кристаллу и удаленных друг от друга, и пренебрегалось перекрытием их упругих полей. Несложные оценки с использованием суммирования вкладов упругих полей дислокаций для стенки с расстоянием l между дислокациями показывают, что учет такого перекрытия может привести к увеличению оценки (1) на множитель $\gamma \sim (1 + (b/l) \ln(\delta/b))$, где b — вектор Бюргерса и δ — толщина двойниковой прослойки. Значения γ зависят от формы и линейной плотности дислокаций на фронте движущегося двойника [10] и могут заметно превышать единицу. Наконец, деформация, связанная с отдельными двойниками, локализована и имеет импульсный характер из-за высокой скорости двойников в образцах конечных размеров. В связи с этим возникает вопрос об установлении равновесного распределения электрического поля в деформируемых образцах и соответствующей модификации оценок теории [2].¹

Приведенные данные, а также результаты контрольных опытов, аналогичных [1,6], дают основания для вывода о связи серий импульсов при двойниковании Nb с эффектом увлечения электронов, причем отдельные импульсы отражают движение отдельных двойниковых прослоек. Исследуя это явление, можно получить информацию о характере протекания процессов двойникования. В частности, длительность импульсов свидетельствует о движении двойников со скоростью, близкой к скорости звука в Nb. Данные по анизотропии электрических откликов свидетельствуют о соответствующей анизотропии перемещения упругих полей деформационных двойников. Это наряду с кинетикой образования двойниковых прослоек не находит, например, объяснения в рамках полюсного механизма двойникования [11] и свидетельствует о движении двойника как целого, например, в результате синхронного движения пакета двойникующих дислокаций (рис. 1). Анизотропия регистрируемых импульсов свидетельствует также о преимущественно прямолинейной ориентации

¹ Недавно Кравченко [13] была проанализирована задача об увлечении электронов локализованными дислокационными скоплениями в образцах конечных размеров. Анализ подтвердил основные выводы работы [2]. Рассмотрена также возможность возникновения «всплесков» электрического потенциала в момент выхода упругих возмущений в приповерхностную область образцов.

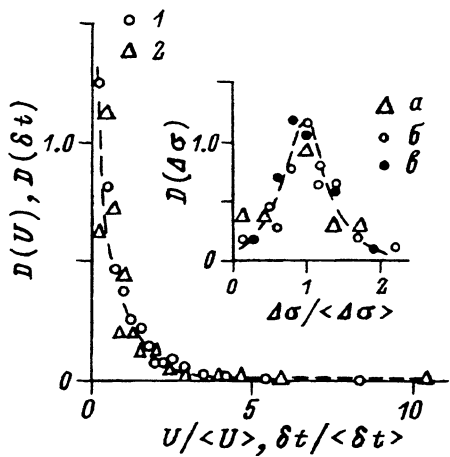


Рис. 5. Плотности функций распределения при двойниковании Nb.

1 — нормированных амплитуд U , 2 — интервалов Δt между соседними импульсами в сериях. На вставке — плотность распределения суммарной амплитуды U_{Σ} серий импульсов (а) и нормированной глубины скачков нагрузки (б, е) два образца Nb.

фронта двойников. Наблюдение отдельных импульсов при перпендикулярном расположении контактов (рис. 3, б) может быть связано с неточностью их кристаллографической ориентации, особенностями на фронте двойников и релаксационными эффектами образования вторичных двойников и аккомодационных полос скольжения [11].

Соотношение (2) позволяет сопоставить амплитуду отдельных импульсов серий с приращением деформации при движении индивидуальных двойников и дислокационных скоплений ($U_i \propto \delta \epsilon_i$). Поэтому методика регистрации электрических откликов может быть использована для оценки их относительного вклада в деформацию кристаллов. Она может быть, например, эффективной при изучении статистики деформационных процессов и, в частности, при анализе этих процессов с точки зрения проявления при этих процессах самоорганизующейся критичности [14, 15]. Уже первые попытки таких исследований [7, 8] показали, что плотности распределения $D(U_i)$ амплитуд импульсов при скачкообразной деформации Nb и Al совпадают, несмотря на различие масштаба процессов и природы носителей деформации (двойники в Nb и дислокации в Al). Это позволило предположить, что статистика этих процессов является универсальной. Дальнейший анализ данных показал, что у Nb и Al совпадают не только $D(U_i)$, но и распределения интервалов Δt_i между соседними импульсами в сериях, что также отражает отмеченную универсальность статистики динамических деформационных процессов и дополнительно стимулирует интерес к этому направлению исследований.

Проиллюстрируем использование метода электрических откликов при статистическом анализе деформационных процессов. На рис. 5 приведены плотности функций распределения $D(U_i)$ и $D(\Delta t_i)$ для Nb. Обращает на себя внимание их хорошее совпадение. Это было бы естественным при выполнении условия $U_i \propto \Delta t_i$, однако анализ данных показал, что сколь-нибудь заметная корреляция между U_i и Δt_i в отдельных сериях импульсов отсутствует. Поэтому совпадение функций $D(U_i)$ и $D(\Delta t_i)$ не является очевидным.

На вставке к рис. 5 приведены также плотности распределения $D(\Delta\sigma_i)$ глубины скачков нагрузки, систематическая зависимость которых от сте-

пени деформации ε учитывалась с помощью нормировки на среднее в интервалах $\Delta\varepsilon$, включающих в себя пять соседних скачков. Здесь же приведены значения плотности распределения суммарной амплитуды электрических импульсов U_{Σ} , нормированной на соответствующие приращения деформации $\Delta\varepsilon$ для каждой серии импульсов (эти данные позволяют наглядно судить о величине дисперсии распределения U_{Σ}). Сопоставляя плотности распределений $D(\Delta\sigma_i)$ и $D(U_i)$, можно сделать вывод, что процессы двойникования, приводящие к возникновению серий импульсов, и скачки нагрузки, которые определяются суммарным действием этих процессов ($\Delta\sigma \propto \Delta\varepsilon \propto U_{\Sigma}$), подчиняются разным статистикам. Этот результат может служить предметом дальнейшего анализа при обсуждении статистических закономерностей развития катастрофических процессов при деформации кристаллов.

В заключение отметим, что представленные данные не только позволяют более определенно связать возникновение электрических импульсов при двойниковании Nb с эффектом увлечения электронов [2], но и демонстрирует возможности использования этого явления в качестве методики исследования кинетики и статистики динамических деформационных процессов.

Авторы благодарят В.Я.Кравченко за постоянное обсуждение результатов и внимание к работе, а также Per Bak, Yv.Brechet, Y.Estrin, L.P.Kubin за интерес к проблемам статистики деформационных процессов и С.С.Шевага за помощь при проведении исследований.

Список литературы

- [1] Бобров В.С., Лебёдкин М.А. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. № 7. С. 334–336.
- [2] Кравченко В.Я. // ФТТ. 1967. Т. 9. № 4. С. 1050–1057.
- [3] Lebyodkin M.A., Zorin S.N., Bobrov V.S. // Proc. of the Second Int. Conf. on Phonon Physics. Budapest, 1985. P. 242–244.
- [4] Лебёдкин М.А., Бобров В.С. // Тез. докл. 24-го Всесоюзного совещ. по физике низких температур. Тбилиси, 1986. Ч. 2. С. 105–106.
- [5] Бобров В.С., Лебёдкин М.А. // Тез. докл. Всесоюзной конф. «Фундаментальные проблемы физики ударных волн». Азау, 1987. Т. 1. Ч. 1. С. 87–88.
- [6] Lebyodkin M.A., Kravchenko V.Ya., Bobrov V.S. // Physica B. 1990. V. 165&166. P. 267–268.
- [7] Бобров В.С., Зайцев С.И., Лебёдкин М.А. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 10. С. 3060–3065.
- [8] Бобров В.С., Лебёдкин М.А. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 6. С. 120–125.
- [9] Баранова Г.К., Бобров В.С., Копецкий Ч.В., Сальников Г.И. // ЖЭТФ. 1979. Т. 77. № 1 (7). С. 257–269.
- [10] Косевич А.М. Дислокации в теории упругости. Киев: Наукова думка, 1978. 219 с.
- [11] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 599 с.
- [12] Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М.: Мир, 1979. Т. 1. 399 с.
- [13] Кравченко В.Я. (частное сообщение).
- [14] Bak P., Tang C., Wisenfeld K. // Phys. Rev. A. 1988. V. 38. P. 364–374.
- [15] Bak P., Chen K. // Scientific American. 1991. V. 264. P. 46–53.

Институт физики твердого тела РАН
Черноголовка
Московская обл.

Поступило в Редакцию
15 февраля 1993 г.