

УДК 519.27+539.38+537.31

© 1990

СТАТИСТИКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СКАЧКООБРАЗНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

В. С. Бобров, С. И. Зайцев, М. А. Лебёдкин

В условиях скачкообразной деформации металлов наблюдаются электрические импульсы, связанные с эффектом увлечения электронов проводимости движущимися дефектами. При использовании этого эффекта в качестве методики исследования динамических процессов деформации был проведен статистический анализ и установлено подобие статистики этих процессов при низкотемпературном двойниковании инобия и «катастрофическом» дислокационном скольжении алюминия.

Двигаясь в кристаллах, дислокации передают часть своего импульса электронам проводимости и вовлекают их в дрейфовое движение [1]. В работах [2-4] сообщалось о наблюдении электрических эффектов различной природы при низкотемпературной скачкообразной деформации некоторых металлов (Nb, Al, Re, Mo, W). Наиболее подробно эти эффекты изучались в условиях деформационного двойникования Nb и дислокационного скольжения Al. Исследования показали, что регистрируемые на гранях образцов в моменты скачков нагрузки серии коротких электрических импульсов ($\tau \sim 3$ мкс) могут быть связаны с предсказанным в [1] эффектом увлечения электронов проводимости движущимися дефектами. При общей продолжительности таких серий $\sim 0.1-1$ мс они обычно содержали до 20-30 импульсов. Каждый импульс в сериях можно связать с движением отдельных двойников в Nb или дислокационных скоплений в случае Al.

Наблюдение электрических эффектов позволяет судить о динамике и характере развития деформационных процессов в условиях скачкообразной деформации металлов. В представленной работе на основании регистрации этих эффектов проведен статистический анализ и сопоставлены закономерности протекания динамических процессов при деформационном двойниковании Nb и «катастрофическом» дислокационном скольжении Al. Установлено подобие распределения электрических импульсов по амплитудам, что может свидетельствовать об универсальности закономерностей, определяющих статистику динамических деформационных процессов в условиях скачкообразной деформации.

1. М е т о д и к а

Исследования электрических импульсов проводились в условиях низкотемпературной скачкообразной деформации монокристаллов Nb ($\langle 110 \rangle$) и Al ($\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$) (рис. 1). Образцы с характерными размерами $10 \times 4 \times 4$ мм деформировались сжатием со скоростью 100 мкм/мин при температуре ниже 10 К.

Для регистрации электрических импульсов на гранях деформируемых образцов размещались контакты и использовалась измерительная система с полосой пропускания 50 Гц—1 МГц, включающая охлаждаемый транс-

форматор, предусилитель и запоминающий осциллограф С8-12 [2, 4]. Заметное искажение фронта импульсов отсутствовало при длительности $\tau \geq 0.5$ мкс.

Примеры серий электрических импульсов, регистрируемых в моменты скачков нагрузки при деформировании Nb и Al, представлены на рис. 2. В случае Al чувствительность регистрации импульсов ограничивалась уровнем шумов (≤ 0.08 мкВ), а при деформационном двойниковании Nb уровень чувствительности ($\sim 2-4$ мкВ) определялся выбором динамического диапазона осциллографа для регистрации достаточно широкого (по амплитуде) спектра импульсов, включая импульсы большой амплитуды.

Для характеристики исследуемых деформационных процессов использовались абсолютные значения амплитуд импульсов ($U_j = |U_j|$). Стати-

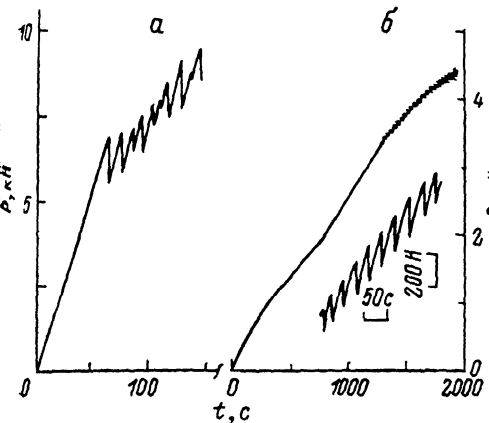


Рис. 1. Примеры кривых деформации Nb (а) и Al (б) в условиях сжатия при 4.2 К со скоростью 100 мкм/мин (P — нагрузка, t — время).

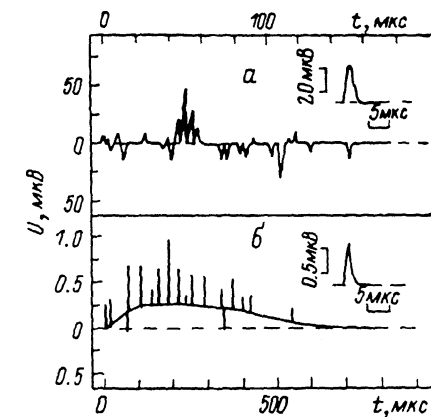


Рис. 2. Примеры серий электрических импульсов, регистрируемых в моменты скачков нагрузки в условиях двойникования Nb (а) и дислокационного скольжения Al (б).

На вставках — примеры отдельных импульсов серий. В случае Al электрические импульсы наблюдаются на фоне сигнала термоэпс.

стическая обработка данных при построении гистограмм проводилась по 60 сериям ($N=690$ импульсов) в случае Al и 50 сериям ($N=535$) в случае Nb. Разбиение значений U_j по классовым интервалам (ΔU_i), производилось начиная с пороговых значений $U=0.08$ мкВ (Al) и 4 мкВ (Nb), и подсчитывалось число n_i значений U_j , попадающих в интервал $(U_i - (\Delta U_i)/2, U_i + (\Delta U_i)/2)$. Учитывая, что масштаб импульсов в случае Nb и Al существенно отличается (см., например, рис. 2), при построении гистограмм использовали классовые интервалы $(\Delta U)_0 = \langle U \rangle / 4$, где средние значения амплитуд импульсов $\langle U \rangle = \Sigma U_j / N \approx 0.3$ и 37 мкВ для Nb и Al соответственно. При значениях амплитуд $U / \langle U \rangle \geq 2.6$ (Nb) и 4.8 (Al), когда количество импульсов было мало, ширина интервалов $(\Delta U)_i$ увеличивалась так, чтобы в каждом классе содержалось не менее 5 импульсов.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 3, 4 для Nb и Al приведены гистограммы распределения импульсов по амплитудам $n_i(U)$. Воспользуемся ими для характеристики процессов двойникования Nb и «катастрофического» дислокационного скольжения Al. Действительно, используя результаты теории [1], приращение деформации $\delta \epsilon$ и механическую энергию E , выделяющуюся в системе «машина—образец» при движении дефектов, можно связать с ампли-

тудой и длительностью импульсов [4]: $\delta\varepsilon \sim U\tau$ и соответственно $E \approx LP\delta\varepsilon$, где P — нагрузка на образце, L — его длина в момент скачка нагрузки. Более строгие оценки $\delta\varepsilon$ можно получить, измеряя площадь соответствующих импульсов. Полученные данные не позволяют провести такие оценки

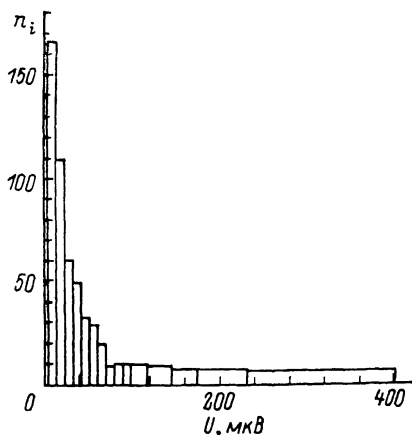


Рис. 3. Гистограмма $n_i(U)$ амплитуд импульсов при двойниковании Nb.

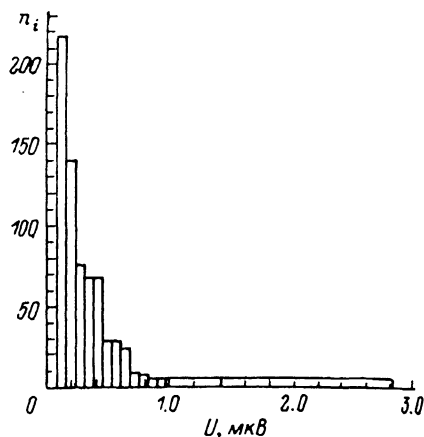


Рис. 4. Гистограмма $n_i(U)$ амплитуд импульсов при скачкообразной деформации Al.

для серий импульсов, так как при регистрации совокупности импульсов аппаратура, использованная на данном этапе исследований, не позволяла одновременно достаточно хорошо разрешать отдельные импульсы серий. Однако, как показывают контрольные опыты по наблюдению отдельных импульсов серий (см., например, рис. 2), форма большинства импульсов

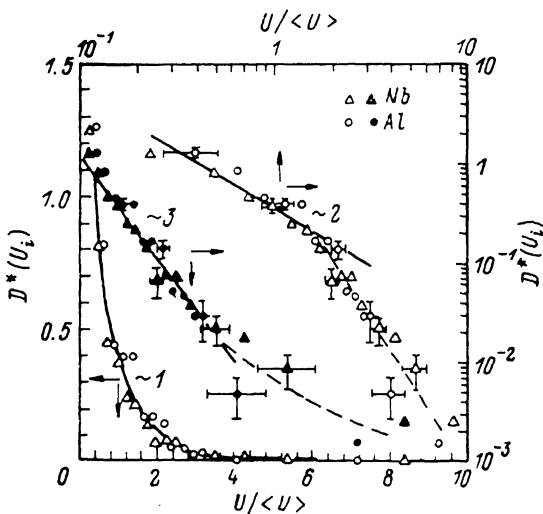


Рис. 5. Нормированные функции плотности распределения амплитуд электрически импульсов $D^*(U_i/\langle U \rangle)$ для Nb и Al в линейном (1), логарифмическом (2) и полупологарифмическом (3) масштабах (оси указаны стрелками).

Для отдельных точек приведены нормированные погрешности $\delta = (\Delta U_i)/2\langle U \rangle$ и $\Delta = (D^*/N (\Delta U_i)^*)^{1/2}$

была близка к «треугольной», а их длительность лежала в узком интервале вблизи средних значений $\langle \tau \rangle \approx 3$ мкс, только в отдельных случаях τ изменялась в диапазоне 2—5 мкс. Это позволяет полагать, что приведенные выше оценки для $\delta\varepsilon$ и E являются удовлетворительными.

Из рис. 3, 4 видно, что распределения амплитуд импульсов для Nb и Al качественно подобны. Для количественного сопоставления плотности функций распределения $D(U_i) = n_i/N (\Delta U_i)$ воспользуемся нормированными значениями амплитуды $U_i/\langle U \rangle$ и ширины классовых интервалов

$(\Delta U)_i^* = (\Delta U)_i / \langle U \rangle$. Перенормированные функции $D^*(U_i / \langle U \rangle) = n_i / N (\Delta U)_i^* = D(U_i / \langle U \rangle)$ для Nb и Al представлены на рис. 5 (кривая 1). Видно, что наблюдается не только качественное, но и хорошее количественное совпадение соответствующих зависимостей. Это свидетельствует о подобии статистических закономерностей процессов деформационного двойникования и дислокационного скольжения в условиях низкотемпературной скачкообразной деформации исследованных металлов.

Обнаруженное подобие распределения импульсов по амплитудам является в определенной степени неожиданным. Обратим, например, внимание на известное отличие носителей деформации (двойники и дислокационные скопления) в Nb и Al, а также на отличие масштабов амплитуд импульсов: $U \sim 10 \div 100$ мкВ (Nb) и $U \sim 0.1 \div 1$ мкВ (Al) и соответственно масштабов $\delta\varepsilon$ и E . Совпадение статистических закономерностей, описывающих динамические деформационные процессы, разные по масштабу и характеру носителей деформации, может свидетельствовать об их универсальности.

При обсуждении природы универсальности статистики деформационных процессов можно попытаться привлечь представления о самоорганизующихся критических состояниях [5]. Эти представления используются для описания различных физических, биологических, социальных процессов и, в частности, землетрясений [5-7].¹ На основе машинного моделирования было показано [5], что распределение характеристических параметров (например, энергии) таких процессов подчиняется степенному закону

$$D(E) \approx E^{-\beta}, \quad (1)$$

где β зависит от размерности системы, например $\beta \approx 1$ и 1.37 для двумерных (2D) и трехмерных (3D) систем. Аналогичный вид имеет и распределение времен развития этих процессов

$$D(\tau) \approx \tau^{-\gamma}, \quad (2)$$

где, согласно [5], $\gamma \approx 0.43$ и 0.92 для 2D- и 3D-систем соответственно. Отклонения от зависимостей (1), (2) в области малых и больших значений E и τ связаны с дискретностью и размерами моделируемой системы, причем эти отклонения более выражены для распределения временных характеристик моделируемых процессов.

С целью проверки роли «самоорганизующейся критичности» в динамических деформационных процессах на рис. 5 (кривая 2) приведены зависимости $D^*(U_i / \langle U \rangle)$ в логарифмическом масштабе. Видно, что в диапазоне $U_i / \langle U \rangle \leq 2$ (заполнение классов $n_i \geq 19$ (Nb) и 24 (Al)) функции $D^*(U_i / \langle U \rangle)$ удовлетворительно описываются степенной зависимостью (1): $\beta \approx 1.06 \pm 0.24$ и 1.32 ± 0.20 для Nb и Al соответственно или $\beta \approx 1.12 \pm 0.19$ для совокупности данных. Это могло бы свидетельствовать о проявлении самоорганизующейся критичности в условиях скачкообразной деформации исследованных металлов. Отметим, однако, что зависимость (1) описывает экспериментальные данные в относительно небольшом диапазоне U_i и $D^*(U_i / \langle U \rangle)$, и, как будет показано ниже, в более широком диапазоне $D^*(U_i / \langle U \rangle)$ хорошо описывается экспоненциальной зависимостью. Далее обратим внимание на то, что для вывода о реализации самоорганизующейся критичности необходимо одновременное выполнение зависимостей (1), (2). В то же время, как уже отмечалось выше, длительность τ большинства регистрируемых импульсов группируется вблизи $\langle \tau \rangle$, что не соответствует зависимости (2). Таким образом, пока нет достаточных оснований для вывода о проявлении самоорганизующейся критичности в исследуемых деформационных процессах.

Обработка данных в полул로그арифмическом масштабе (рис. 5, кривая 3) свидетельствует о том, что плотности функций распределения

¹ Вопрос о возможной аналогии между скачкообразной деформацией и землетрясениями уже затрагивался в [8]. Это предположение используется и автором сообщения [7] при обсуждении наших предварительных результатов [8].

$D^*(U_i/\langle U \rangle)$ хорошо описываются экспоненциальной зависимостью $D^*(U_i/\langle U \rangle) \sim \exp(-\alpha U_i/\langle U \rangle)$, причем согласие с экспериментальными данными наблюдается в более широком диапазоне U ($U_i/\langle U \rangle \leq 3.5$) по сравнению со степенной зависимостью (1). Воспользуемся для аппроксимации $D^*(U_i/\langle U \rangle)$ функцией

$$D^*(U/\langle U \rangle) = \alpha \exp(-\alpha U/\langle U \rangle). \quad (3)$$

Используя метод наименьших квадратов, с помощью последовательного приближения [9] получим следующие оценки параметра: $\alpha \approx 1.21 \pm 0.15$ для совокупности данных или $\alpha \approx 1.21 \pm 0.12$ и 1.20 ± 0.19 для Nb и Al соответственно. Видно, что эти оценки близки к значению $\alpha \approx 1$. При исключении из анализа данных области U , где наблюдается заметное отклонение от (3), оценки α становятся еще более близкими к единице. Таким образом, в диапазоне $U_i/\langle U \rangle \leq 3.5$ зависимости $D^*(U_i/\langle U \rangle)$ для Nb, Al и совокупности данных удовлетворительно описываются показательным законом [10] $D^*(U_i/\langle U \rangle) \approx \exp(-U_i/\langle U \rangle)$, причем проверка по критерию χ^2 [9] показывает лучшее согласие с этим законом в случае Nb. Значительный разброс данных, наблюдаемый при увеличении амплитуды, связан с недостаточностью статистики при больших U . Причиной отклонения от показательного закона в этой области U могут быть, например, случайное наложение двух импульсов и регистрация их в качестве одного из-за конечного временного разрешения аппаратуры или эффекты, связанные с выходом носителей деформации в область одного из измерительных контактов.

Так как длительность импульсов τ лежит в узком интервале вблизи $\langle \tau \rangle$, то распределение импульсов по амплитудам отражает распределение приращений деформации ($\delta \varepsilon \sim U\tau$). Значения $\delta \varepsilon$ в свою очередь зависят от мощности и длины пробега носителей деформации. Согласно данным металлографии деформированных образцов Nb, длина пробега двойников, как правило, ограничивается геометрическими размерами исследованных кристаллов.² Поэтому зависимость $D^*(U_i/\langle U \rangle)$ можно, например, связать с распределением источников двойников и полос скольжения по мощности. Отметим, что при двойниковании Nb роль источников могут играть концентраторы напряжений, а при дислокационном скольжении Al можно также принять во внимание распределение препятствий, в области которых формируются дислокационные скопления. Можно предположить, что именно распределение источников носителей деформации определяет зависимость $D^*(U/\langle U \rangle)$. Вместе с тем отметим, что вопрос о причинах, которые могут приводить к универсальному характеру статистики деформационных процессов, остается открытым; необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Суммируя результаты, можно сделать вывод о том, что закономерности развития деформационного двойникования Nb и «катастрофического» дислокационного скольжения Al являются статистически подобными. Это позволяет высказать предположение об универсальности закономерностей, определяющих статистику динамических деформационных процессов в условиях низкотемпературной скачкообразной деформации металлов.

В качестве причины такой универсальности могло бы служить проявление самоорганизующейся критичности в процессах деформации. Однако анализ данных не позволяет пока сделать такой вывод. В более широком диапазоне U экспериментальные данные описываются показательным законом распределения. Отметим, что использование представлений о самоорганизующейся критичности может быть перспективным и, на наш

² Отметим, что при таком ограничении длины пробега длительность ($\tau \sim 3$ мкс) и характер распределения τ в Nb и Al могут свидетельствовать о движении дефектов со скоростями, близкими к предельным значениям (поперечный звук [11]).

взгляд, заслуживает внимания при анализе различных деформационных процессов.

Для выяснения причин, приводящих к универсальному характеру статистики динамических процессов деформации в Nb и Al, необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования. Будет представлять интерес расширение статистического материала для исследованных металлов, включая обработку данных по площади импульсов и анализ временных характеристик деформационных процессов, а также исследования статистических закономерностей развития деформации с использованием других материалов, экспериментальных методик и способов статистической обработки данных.

Авторы благодарят В. Я. Кравченко, С. П. Обухова и Д. Е. Хмельницкого за внимание к работе и обсуждение результатов, С. С. Шевага за методическую помощь при проведении исследований.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Кравченко В. Я. // ФТТ. 1967. Т. 9. № 4. С. 1050—1057.
- [2] Бобров В. С., Лебедкин М. А. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. № 7. С. 334—336.
- [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] Бобров В. С., Лебедкин М. А. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 6. С. 120—125.
- [5] Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. // Phys. Rev. A. 1988. V. 38. P. 364—374; Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 381.
- [6] Bak P., Tang C. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 15635.
- [7] Bak P. // Preprint. Brookhaven National Lab., 1990.
- [8] Бобров В. С., Зайцев С. И., Лебедкин М. А. // Тез. докл. V Всес. семинара «Структура дислокаций и механические свойства металлов и сплавов». Свердловск, 1990. С. 185—186.
- [9] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. 832 с.
- [10] Пугачев В. С. Введение в теорию вероятностей. М.: Наука, 1968. 368 с.
- [11] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 599 с.

Институт физики твердого тела АН СССР
Черноголовка
Московская область.

Поступило в Редакцию
26 апреля 1990 г.