

05

Размеры скачков и уровни деформации металлов

© В.В. Шпейзман

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия
E-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 февраля 2018 г.

Предлагается характеризовать уровни деформации величиной ее скачков, которые можно наблюдать при точном измерении скорости деформации в экспериментах с постоянной или заданной по определенному закону нагрузкой. С помощью прецизионной интерферометрической методики измерена скорость и рассчитаны скачки деформации меди, свинца и олова в микро- и нанометровом диапазонах. Показана корреляция размера скачков с величиной вектора Бюргера дислокаций в металлах и сделаны предположения о коллективах дислокаций, участвующих в формировании скачка деформации.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.15.46444.17241

Многоуровневый характер деформации отмечается во многих исследованиях (см., например, [1–4]). Как правило, понятие „много“ сводится к макро- и микроуровням, к которым в некоторых случаях добавляются мезо- и наноуровни. Неопределенность такого подхода очевидна из-за отсутствия четких границ перехода от одного уровня к другому и различия в структурных характеристиках деформации на разных уровнях. В [5] было предложено определять уровни по величине скачков деформации, которые, как показано в [5–7], всегда наблюдаются при прецизионных измерениях скорости деформации. С помощью разработанной ранее интерференционной методики измерения скорости и величины деформации для различных по природе материалов (металлов, полимеров, композитов) при одноосном нагружении были обнаружены скачки деформации, которые можно описать несколькими характерными размерами изменения длины образца Δl . Именно этими размерами было предложено определять уровень деформации, причем существовала определенная иерархия скачков, согласно которой скачки каждого последующего уровня включали в себя скачки предыдущего

уровня. В первых работах этого цикла были рассмотрены микрометровые скачки и для разных материалов и условий деформации были выделены один-три характерных размера, или уровня деформации [8]. В монокристаллах LiF с различным содержанием Mg один из уровней (скачков) совпадал со средним расстоянием между примесями. В металлах наибольший размер скачка близок к размеру зерна, а наименьший коррелирует с величиной вектора Бюргерса дислокаций b [6]. В дальнейшем в связи с развитием методики измерений и обработки результатов появилась возможность оценить нанометровые скачки, вследствие чего было получено пять-шесть уровней деформации с размерами скачков от единиц нанометров до десятков микрометров [5].

В настоящей работе проведено измерение микро- и нанометровых скачков деформации ряда поликристаллических металлов и проанализирована связь величины скачков на начальной стадии деформации с величиной вектора Бюргерса дислокаций как в микро-, так и в нанометровом диапазоне. При этом предполагалось, что в рассматриваемых случаях основным механизмом деформации является самосогласованное движение групп дислокаций с характерными размерами, равными величине скачка деформации. В отличие от ранних работ [6–8] экспериментальной базой для определения средних величин микрометровых скачков служили не единицы, а десятки и более измерений. Нанометровые скачки деформации металлов определены впервые.

Образцы меди (99.98 wt.%), свинца (99.98 wt.%) и олова (99.98 wt.%) диаметром 3 mm и высотой 6 mm испытывались в режиме ползучести на сжатие при постоянном напряжении и комнатной температуре. Используемая методика измерения величины и скорости деформации основана на эффекте изменения частоты света, отраженного от изменяющего длину образца (эффект Доплера). В результате интерференции первичного и отраженного лучей лазера получают низкочастотные биения (рис. 1), частота которых определяет скорость деформации, а число биений — ее величину. Указанная методика позволяет определять скорость и величину деформации с шагом по изменению длины образца $\Delta l_0 = 0.325$ nm при частоте дискретизации (частоте следования точек на интерферограмме) до 10 kHz ($\Delta l_0 = \lambda/2$, где λ — длина волны лазера, используемого в установке). Специально разработанное программное обеспечение позволяло производить сбор, обработку и хранение информации, получаемой в эксперименте, в режиме online [7]. Также обработка экспериментальных данных проводилась с применением ПО MATLAB и Origin9.0.

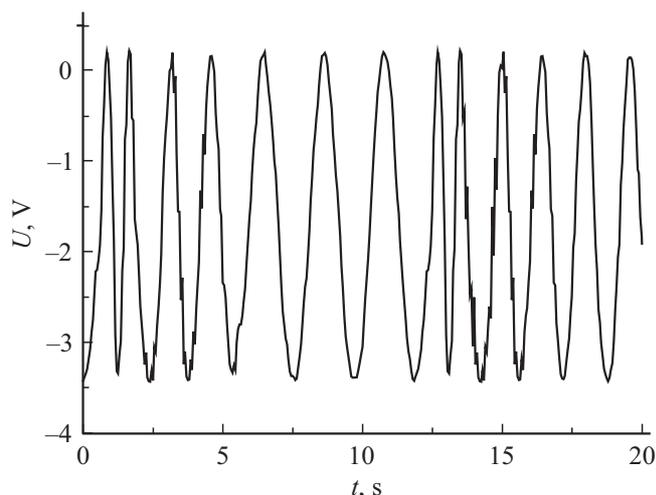


Рис. 1. Участок интерферограммы, показывающий периодичность изменения скорости деформации меди.

Рис. 1 демонстрирует неравномерность изменения скорости в процессе деформации. Отклонения величины скорости деформации от ее закономерного изменения, за которое принималась усредненная зависимость скорости от времени, указывают на скачкообразный характер деформации. За „скачок“ деформации L принимается средняя величина абсолютной деформации Δl (изменения длины образца без учета его знака) между близкими по величине скачками скорости. Микрометровые скачки деформации рассчитывались по зависимости $\Delta \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}(\Delta l)$, где $\Delta \dot{\epsilon}$ — отклонение экспериментальной величины относительной скорости от ее значения на усредненной кривой, Δl — изменение длины образца.

Величина нанометровых скачков оценивалась по отклонению формы одиночных биений на интерферограмме от стандартной. При этом использовался тот же принцип, что и для микрометровых скачков, однако вместо отклонения скорости бралась величина отклонения сигнала $\Delta U / U_0$, где U_0 — амплитуда биения. Для каждого материала произвольным образом выбиралось несколько одиночных биений, которые аппроксимировались зависимостью $U = U_0 \sin(\omega(t - t_0))$, где ω —

частота расчетного сигнала, а t_0 — время, соответствующее нулевому значению сигнала.

Величина скорости деформации в случае ее оценки по начальной длине образца для всех исследованных материалов была равна $10^{-6} - 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

На рис. 2, *a* в качестве примера приведен участок зависимости $\Delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}(\Delta l)$ для свинца. Аналогичные зависимости были получены для меди и олова. Уточненные результаты для микрометровых скачков деформации исследованных металлов сравнивались с полученными в [6], размеры нанометровых скачков деформации металлов в области малых деформаций ранее не были известны. Как видно из рис. 2, *a*, колебания скорости деформации следуют через близкие по величине деформации образца, которые формируют микрометровые скачки. Расчет средней величины скачка деформации L по 30 скачкам, показанным на рис. 2, *a*, дает $L = 1.17 \pm 0.09 \mu\text{m}$, что близко к приведенному в [6] значению $L = 1.1 \mu\text{m}$. Для меди и олова были получены соответственно $L = 1.07 \pm 0.11$ и $1.33 \pm 0.15 \mu\text{m}$. Эти значения также близки к приведенным в [6]. На рис. 2, *a* можно заметить также два больших микрометровых скачка с размерами $\sim 10 - 20 \mu\text{m}$ (см. усредненную кривую).

Нанометровые скачки малого размера при деформации свинца показаны на рис. 2, *b*. На отрезке $\Delta l \sim 100 \text{ nm}$ можно видеть 14 скачков с близкой величиной деформации L . Точное измерение среднего значения и среднеквадратичной ошибки дает $L = 7.1 \pm 0.5 \text{ nm}$. Так же как и в случае микрометровых скачков деформации, можно заметить, что малые скачки образуют скачок более крупного ($\sim 80 \text{ nm}$) размера. Для меди и олова были получены соответственно $L = 3.9 \pm 0.4$ и $9.6 \pm 0.7 \text{ nm}$.

В [6] для ряда поликристаллических металлов и монокристаллов LiF была установлена линейная зависимость между размерами малых микрометровых скачков деформации и величиной вектора Бюргера дислокаций b . Полученные в настоящей работе результаты позволяют уточнить эту зависимость для микрометровых скачков и проверить, соблюдается ли она для нанометровых скачков. На рис. 3 показаны новые результаты и данные, приведенные ранее в [6]. Как видно, линейная зависимость между L и b соблюдается как для микрометровых, так и для нанометровых скачков. Зависимости $L(b)$ можно описать выражением $L = 630 + 1310b$ для микрометровых скачков и

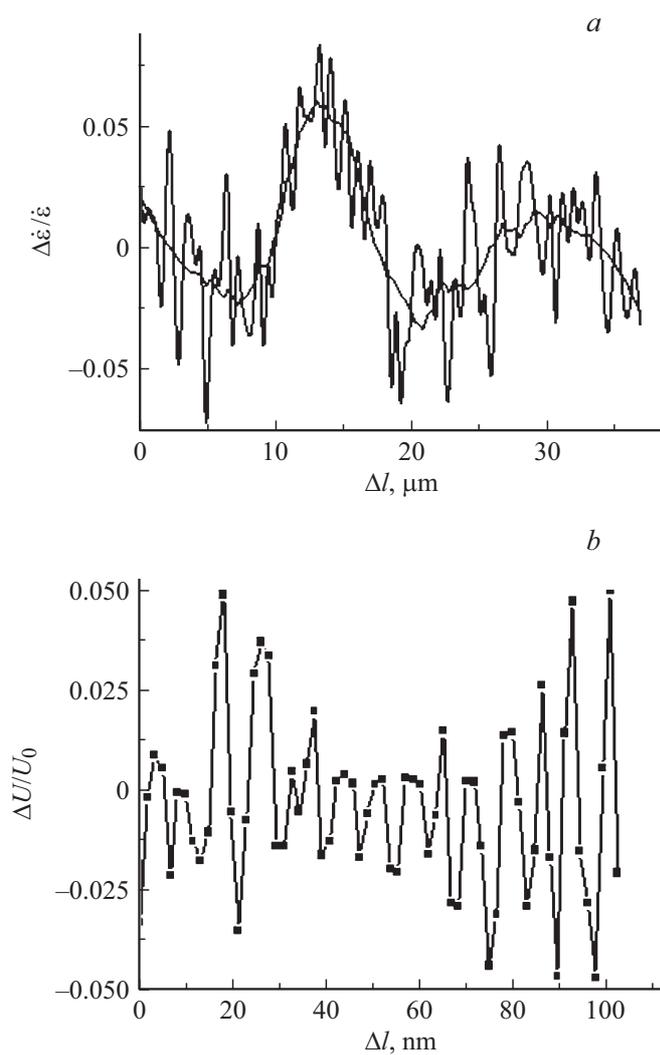


Рис. 2. Микрометровые (a) и нанометровые (b) скачки деформации при одноосном сжатии образцов свинца.

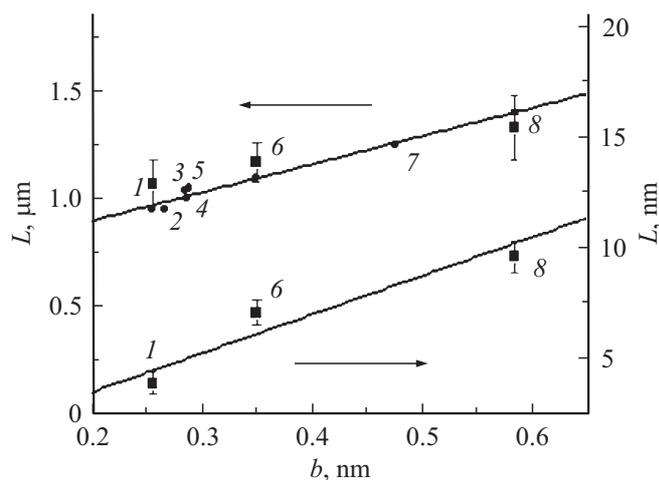


Рис. 3. Зависимости размера микрометровых (вверху) и нанометровых (внизу) скачков деформации от величины вектора Бюргера дислокаций в различных материалах. 1 — Cu, 2 — Zn, 3 — Al, 4 — LiF, 5 — Ag, 6 — Pb, 7 — Sb, 8 — Sn. Данные, показанные кружками, взяты из работы [6].

выражением $L = 0.01 + 17.5b$ для нанометровых, если в обоих случаях L и b выразить в нанометрах. Поскольку вторая зависимость начинается практически в нулевой точке, это означает, что достаточно 17–18 дислокациям сделать один „шаг“ на величину b , чтобы образовать нанометровый скачок. Еще меньшее их количество требуется, если рассматривать двойные и более крупные „шаги“. Тот факт, что указанные значения одинаковы для разных металлов, свидетельствует в пользу предположения об одинаковых устойчивых структурных элементах, определяющих процесс деформации, что приближает нас к пониманию элементарного акта деформации металлов.

Микрометровые скачки в разных металлах содержат разное число нанометровых скачков (от ~ 140 в Sn до ~ 270 в Cu), и в них участвуют, если по-прежнему считать только одиночные „шаги“, соответственно от ~ 2500 до ~ 4800 дислокаций. Сделанные оценки являются весьма приближенными, но они подчеркивают коллективный характер самосогласованного движения дислокаций, обуславливающего скачкообразную деформацию материалов.

Список литературы

- [1] Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 230 с.
- [2] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
- [3] Владимиров В.И. Физическая природа разрушения. М: Металлургия, 1984. 280 с.
- [4] Конева Н.А., Козлов Э.В. // Изв. вузов. Физика. 1990. № 2. С. 89–106.
- [5] Шпейзман В.В., Песчанская Н.Н. // ФТТ. 2011. Т. 53. В. 6. С. 1169–1174.
- [6] Песчанская Н.Н., Шпейзман В.В., Синани А.Б., Смирнов Б.И. // ФТТ. 2004. Т. 46. В. 11. С. 1991–1995.
- [7] Шпейзман В.В., Песчанская Н.Н., Якушев П.Н., Смолянский А.С., Шведов А.С., Черемисов В.Г. // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 2. С. 248–252.
- [8] Песчанская Н.Н., Христова Ю. // ФТТ. 2006. Т. 48. В. 10. С. 1786–1790.