

О НОВОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ДИСЛОКАЦИЮ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЕЕ ДВИЖЕНИЯ

*В. В. Зонинашвили, И. А. Наскидашвили,
В. А. Мелик-Шажназаров*

С помощью спектрометра механической релаксации, позволяющего проводить акустические исследования образцов в процессе их упругого нагружения, исследовано взаимодействие дислокаций с поляризованной атмосферой атомов кислорода в ниобии (атмосферой Снука). Полученные в образцах с сформированной атмосферой зависимости дислокационного поглощения звука Q^{-1} от квазистатической нагрузки σ показывают, что напряжения, при которых дислокация проходит центр атмосферы в процессе нагружения и разгрузки σ_1 и σ_2 соответственно, заметно различаются на эксперименте. Возникновение такого гистерезиса на зависимостях $Q^{-1}(\sigma)$ обусловлено наличием сил трения, действующих на дислокацию при ее движении, и мерой этих сил может служить величина $\delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$. Зависимости сил трения от скорости нагружения при различных температурах, полученные в работе несколько необычным способом, т. е. из соответствующих зависимостей $\delta\sigma$, не противоречат существующим представлениям.

Известно, что дальнедействующее взаимодействие дислокаций с точечными дефектами, обладающими тетрагональной симметрией (например, примеси внедрения типа O, N, C) в ОЦК металлах, приводит к ориентационному упорядочению дефектов в упругом поле дислокаций и образованию поляризованных атмосфер примесных атомов, так называемых атмосфер Снука [1-3].

В работе представлены результаты акустических исследований взаимодействия дислокаций с поляризованной атмосферой атомов кислорода в ниобии. Ранее [4, 5] было показано, что в деформированных образцах ниобия, содержащих кислород, такие поляризованные атмосферы атомов кислорода могут быть созданы выдержкой образцов при тех или иных нагрузках σ^* в течение нескольких часов при комнатной температуре, причем атмосфера формируется около тех положений дислокаций, которые соответствуют напряжениям σ^* . Если эти напряжения находятся в квазиупругой области, то, согласно [5], после разгрузки образцов и при последующем их нагружении на зависимости низкочастотного поглощения звука Q^{-1} от квазистатической нагрузки σ наблюдается характерный минимум Q^{-1} при $\sigma \approx \sigma^*$. Наличие минимума Q^{-1} при $\sigma \approx \sigma^*$ объясняется тем, что в процессе нагружения при этих напряжениях дислокация проходит через центр сформированной атмосферы, и поскольку при этом градиент сил ($\partial F_{SN}/\partial x$), действующих на дислокацию со стороны атмосферы, максимален [3], то поглощение звука Q^{-1} должно быть минимальным, так как, согласно [5], оно падает с ростом $\partial F_{SN}/\partial x$: $Q^{-1} \sim 1/(\text{const} + \partial F_{SN}/\partial x)$.

В настоящей работе показано, что аналогичный минимум имеет место и в процессе разгрузки образцов, причем напряжения, при которых наблюдается минимум Q^{-1} , отличаются по величине в зависимости от того, получены они в процессе нагружения или разгрузки, хотя и остаются близкими к σ^* . Если σ_1 — напряжение, при котором наблюдается мини-

мум Q^{-1} в процессе нагружения, а σ_2 — в процессе разгрузки, то $\sigma_2 \leq \sigma^* \leq \sigma_1$. В работе показано, что величина $\delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ определяется непосредственно напряжением трения σ_f , действующим на дислокацию при ее движении. Это обстоятельство позволяет предложить новый способ определения напряжений трения, действующих на дислокацию, и из полученных зависимостей $\delta\sigma$ от температуры и скорости нагружения определить скоростные и температурные зависимости σ_f .

1. Методика эксперимента

Методика акустических исследований взаимодействия дислокаций с поляризованной атмосферой атомов кислорода в ниобии подробно описана в [5]. Отметим только, что для исследований использовался спектрометр механической релаксации, позволяющий проводить низкочастотные акустические исследования образцов в процессе их упругого нагружения или пластической деформации, описанный в [6]. Измерения проводились на частоте $\sim 10^3$ Гц в интервале температур 240—300 К. Интервал изменения скоростей нагружения $\dot{\sigma}$ составлял 0.07—0.5 МПа·с⁻¹. Поглощение звука (в единицах обратной добротности вибратора Q^{-1}) определялось по декременту затухания свободных крутильных колебаний образца с точностью не хуже 1.5%. В экспериментах использовались образцы из чистого зонно-плавленного ниобия, содержащие $1.5 \cdot 10^{-2}$ ат. % кислорода. Для увеличения плотности подвижных дислокаций образцы предварительно деформировались на 5—7% при комнатной температуре непосредственно в установке, причем их предел текучести после этого при $T \sim 300$ К был ≥ 280 МПа. Поскольку прикладываемые в дальнейшем напряжения не превышали 200 МПа, т. е. находились в квазиупругой области, вызываемые ими смещения дислокаций носили обратимый характер.

2. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены зависимости $Q^{-1}(\sigma)$, полученные при $T \sim 248$ К и $\dot{\sigma} \sim 0.2$ МПа·с⁻¹ в процессе нагружения (кривые 1, 3) и разгрузки (кривые 2, 4). Для получения этих зависимостей образец нагру-

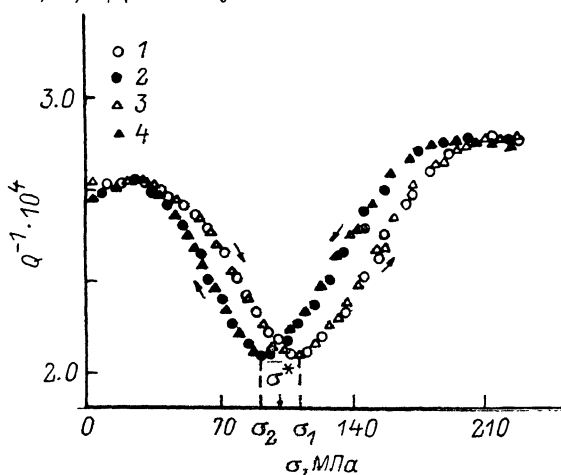


Рис. 1. Зависимость дислокационного поглощения звука от упругой нагрузки для $\sigma^* \sim 100$ МПа и $T \sim 248$ К.

1 — нагружение, 2 — разгрузка, 3 — повторное нагружение, 4 — повторная разгрузка.

жался до напряжений $\sigma = \sigma^* \sim 100$ МПа при комнатной температуре, затем выдерживался при этой нагрузке в течение 6 ч, что приводило к образованию атмосферы при $\sigma = \sigma^*$, и дальше охлаждался под нагрузкой ~ 100 МПа до температуры ~ 248 К. После этого образец разгружался

до $\sigma=0$, и затем снимались зависимости $Q^{-1}(\sigma)$. Как видно из рис. 1, минимум Q^{-1} наблюдается в процессе нагружения при $\sigma=\sigma_1 > \sigma^*$ (кривая 1), а в процессе разгрузки — при $\sigma=\sigma_2 < \sigma^*$ (кривая 2), причем повторное нагружение (кривая 3) полностью воспроизводит кривую 1, а повторная разгрузка (кривая 4) — кривую 2. Воспроизводимость кривых $Q^{-1}(\sigma)$ при нагружении (кривые 1, 3) и разгрузке (кривые 2, 4) свидетельствует о стабильности атмосферы при $T \leq 250$ К, т. е. о практически полной неподвижности атомов кислорода при этих температурах.

Более того, можно считать (рис. 2), что атомы кислорода неподвижны (по крайней мере для используемого в экспериментах интервала скоростей $0.07 \leq \dot{\sigma} \leq 0.5$ МПа·с⁻¹) уже при $T \sim 255$ К. Действительно, на рис. 2

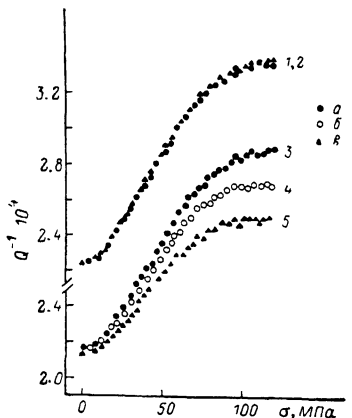


Рис. 2. Зависимости $Q^{-1}(\sigma)$ для $T \sim 255$ (1, 2) и 293 К (3—5) при скоростях нагружения, равных 0.5 (а), 0.2 (б) и 0.07 МПа·с⁻¹ (в).

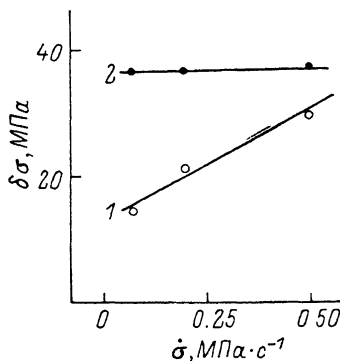


Рис. 3. Зависимость $\delta\sigma$ от скорости нагружения для $T \sim 248$ (1) и ~ 293 К (2).

представлены зависимости $Q^{-1}(\sigma)$, полученные при $T \sim 255$ К (кривые 1, 2) и $T \sim 293$ К (кривые 3—5) в образцах, атмосфера Снука в которых формировалась их выдержкой при $\sigma^*=0$ в течение 6 ч при комнатных температурах. Как видно из этого рисунка, во всех случаях напряжения, при которых Q^{-1} достигает максимума выходя на плато, т. е. напряжения, необходимые, согласно [5], для вывода дислокации из атмосферы, почти не зависят от скорости нагружения, в то время как максимальный уровень Q^{-1} падает по мере уменьшения скорости нагружения для $T \sim 293$ К и не зависит от $\dot{\sigma}$ для $T \sim 255$ К. Ниже будет показано, что полученный результат свидетельствует о том, что если при $T \sim 255$ К в условиях эксперимента атомы кислорода практически неподвижны, то при $T \sim 293$ К подвижностью атомов кислорода пренебрегать нельзя.

Следует отметить, что обнаруженный при $T \sim 248$ К гистерезис на зависимости $Q^{-1}(\sigma)$ (рис. 1) имеет место и при $T \sim 293$ К. При этом величина $\delta\sigma=\sigma_1-\sigma_2$ существенно зависит от скорости нагружения $\dot{\sigma}$ для $T \sim 248$ К (рис. 3, кривая 1) и почти не меняется с изменением $\dot{\sigma}$ для $T \sim 293$ К (кривая 2).

3. Обсуждение результатов

В предыдущем разделе (рис. 1) было показано, что после выдержки образцов при $T \sim 300$ К под нагрузкой σ^* в течение нескольких часов в экспериментах «нагружение—разгрузка» на зависимостях $Q^{-1}(\sigma)$ имеет место гистерезис, причем характерный для этих зависимостей минимум Q^{-1} наблюдается при $\sigma=\sigma_1 > \sigma^*$ в процессе нагружения и при $\sigma=\sigma_2 < \sigma^*$ в процессе разгрузки. Появление этого гистерезиса можно понять, если учесть, что на движущуюся дислокацию действует напряжение трения σ_f , направленное в сторону, противоположную движению дислокации. Действительно, поскольку формирование атмосферы шло при $\sigma=\sigma^*$, то центр

атмосферы при наличии сил трения дислокация должна проходить при $\sigma_1 = \sigma^* + \sigma_f$ в процессе нагружения и $\sigma_2 = \sigma^* - \sigma_f$ в процессе разгрузки. Это значит, что в зависимости от того, как получены кривые $Q^{-1}(\sigma)$ — в процессе нагружения или разгрузки, — напряжения, при которых наблюдается минимум Q^{-1} , должны быть различны, так как, согласно [5], этот минимум имеет место при прохождении дислокацией центра атмосферы, т. е. при $\sigma_1 = \sigma^* + \sigma_f$ в процессе нагружения и при $\sigma_2 = \sigma^* - \sigma_f$ в процессе разгрузки. Величина $\delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = 2\sigma_f$ при этом может служить мерой напряжений трения, действующих на дислокацию при ее движении, и, следовательно, измеряя скоростные и температурные зависимости $\delta\sigma$, можно судить о поведении σ_f в тех или иных условиях. В частности, скоростные зависимости $\delta\sigma$ (рис. 3) свидетельствуют о различной природе сил трения, действующих на движущуюся дислокацию, при $T \sim 248$ К (кривая 1) и $T \sim 293$ К (кривая 2). Действительно, при $T \sim 248$ К наблюдается увеличение $\delta\sigma$ с ростом $\dot{\sigma}$, т. е. рост σ_f с увеличением $\dot{\sigma}$. Поскольку в квазиупругой области (а, как отмечалось ранее, при $\sigma < 280$ МПа мы имеем именно эту ситуацию) $\dot{\sigma}$ прямо пропорционально средней скорости движения дислокаций v , полученные результаты свидетельствуют о том, что при $T \sim 248$ К силы трения растут с ростом скорости движения дислокаций, что является обычным для малых скоростей. Это характерно, например, для сил, имеющих вязкий характер.

Совсем иная картина наблюдается при $T \sim 293$ К. В этом случае $\delta\sigma$ не зависит от $\dot{\sigma}$, т. е. при комнатных температурах σ_f не зависит от скорости движения дислокаций по крайней мере в интервале скоростей нагружения $0.07 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1} \leq \dot{\sigma} \leq 0.5 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$. Такое поведение σ_f обусловлено тем, что для $T \sim 293$ К при использовании указанного интервала скоростей нагружения подвижностью атомов кислорода пренебрегать нельзя.

Действительно, в этом случае атомы кислорода успевают частично поляризоваться вблизи даже движущейся дислокации, причем для больших скоростей движения дислокации (а для подвижности кислорода при $T \sim 300$ К используемые в эксперименте скорости нагружения, следуя [5], должны считаться большими) степень поляризации падает с ростом скорости движения дислокации [7]. Это должно приводить к двум эффектам. Во-первых, из-за того, что степень поляризации атмосферы, а следовательно, и $\partial F_{SN}/\partial x$ [5] падает с ростом $\dot{\sigma}$, максимальный уровень Q^{-1} , пропорциональный $1/(\text{const} + \partial F_{SN}/\partial x)$, должен в этом случае расти. Такая ситуация действительно реализуется при $T \sim 293$ К (рис. 2, кривые 3—5). Во-вторых, согласно представлениям, развитым в [7], образование частично-поляризованной атмосферы Снука около движущейся дислокации приводит к возникновению напряжений трения σ_f , которые падают с ростом v . В результате при $T \sim 293$ К на движущуюся дислокацию, помимо сил трения, аналогичных тем, что имеют место при $T \sim 248$ К (т. е. сил трения, растущих с увеличением скорости движения дислокации), действуют силы трения со стороны частично-поляризованной атмосферы Снука, величина которых падает с ростом $\dot{\sigma}$. В результате суммарная сила трения при $T \sim 293$ К может не зависеть от $\dot{\sigma}$, что и наблюдается в эксперименте (рис. 3, кривая 2).

Таким образом, предложен не совсем обычный способ определения напряжений трения σ_f , действующих на дислокацию на начальной стадии ее движения, причем полученные этим способом скоростные и температурные зависимости σ_f в интервале скоростей нагружения $0.07 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1} \leq \dot{\sigma} \leq 0.5 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$ и температур $248 \leq T \leq 300$ К не противоречат существующим представлениям.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность З. К. Саралидзе за полезные дискуссии, Л. М. Колесниковой и Н. М. Ястребовой за помощь в проведении экспериментов, В. А. Кочерову, А. М. Уварову и И. А. Баглаенко за изготовление образцов.

С п и с о к] л и т е р а т у р ы

- [1] Schoek G., Seeger A. // Acta Met. 1959. V. 7. N 7. P. 469—477.
- [2] Evans J. T., Douthwaite R. M. // Acta Met. 1973. V. 21. N 1. P. 49—54.
- [3] Rosinger H. E., Craig G. B., Bratina W. J. // Phil. Mag. 1972. V. 25. N 6. P. 1331—1343.
- [4] Quist O. P., Carpenter S. H. // Acta Met. 1975. V. 23. N 3. P. 321—328.
- [5] Зонинашвили В. В., Наскидашвили И. А., Мелик-Шахназаров В. А. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 1. С. 161—166.
- [6] Зонинашвили В. В., Мессершмидт У., Мелик-Шахназаров В. А. и др. // ПТЭ. 1984. № 6. С. 175—178.
- [7] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М., 1972. 599 с.

Институт физики АН ГССР
Тбилиси

Поступило в Редакцию
24 июля 1990 г.

