

## ПРОЯВЛЕНИЕ НЕУПРУГОСТИ В МЕТАЛЛАХ ПРИ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ

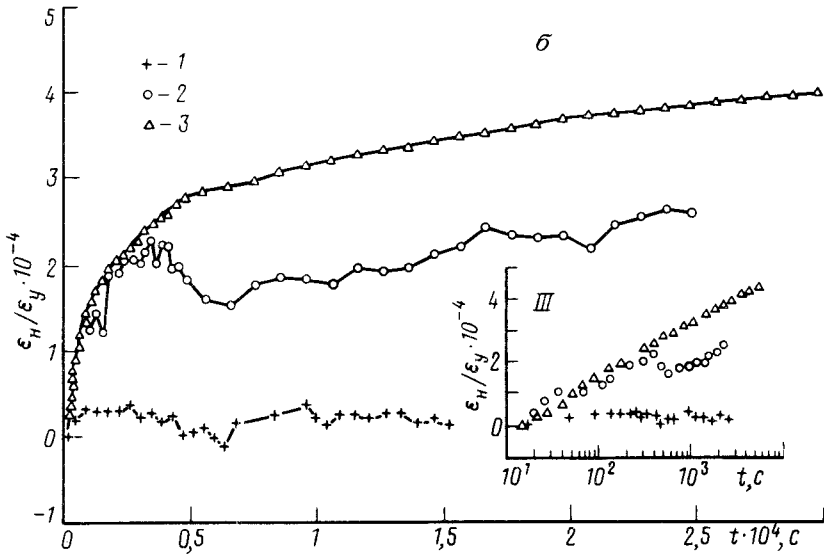
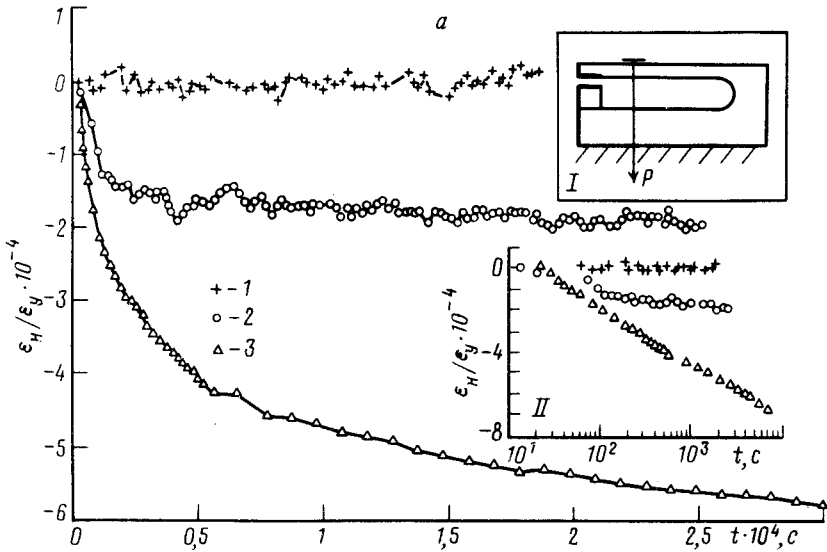
*И.А.Биленко, В.П.Митрофанов, О.А.Охрименко*

В экспериментах по статическому деформированию металлических образцов обнаружено неупругое поведение при напряжениях, существенно меньших предела текучести, на уровне разрешения по деформации  $\Delta\epsilon \sim 10^{-9}$ . Неупругие деформации, носящие релаксационный характер, возникают в предварительно пластически деформированных образцах и исчезают при отжиге.

Неупругость реальных твердых тел обычно связана с их дефектной структурой и движением дефектов в процессе деформирования<sup>1</sup>. Она может проявляться как в динамических экспериментах в виде внутреннего трения при возбуждении колебаний в теле, так и в статических экспериментах, например, в возникновении зависящей от времени деформации при постоянном напряжении. Статические эксперименты, как правило, проводятся либо при больших напряжениях, превышающих предел текучести материала, либо при температурах, близких к температуре плавления, когда деформации относительно велики и их регистрация не представляет большой сложности.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований релаксации упругих деформаций, возникающих в поликристаллических металлах при приложении малых постоянных напряжений ( $\sim 0,1\sigma_T$ ,  $\sigma_T$  – предел текучести) при температуре, близкой к комнатной с использованием высокочувствительной методики измерения малых перемещений<sup>2</sup>. Исследовались поликристаллические образцы сплавов стали 40ХНЮ и алюминия Д16, поскольку они имеют относительно высокие значения предела текучести. Форма образцов изображе-

на на вставке рис. *a*. Там же схематически изображен способ нагружения, при котором происходил изгиб консоли (ее геометрические размеры  $50 \times 10 \times 2$  мм) и в ней возникали неоднородные деформации растяжения—сжатия, распределенные по сечению и длине, мерой которых служило перемещение свободного конца консоли. Оно регистрировалось по изменению электрической емкости между консолью и проводящей поверхностью кварцевого вкладыша. На графиках указана максимальная величина деформации, возникающей в образце. Минимальное изменение деформации, которое можно было регистрировать на временном интервале  $3 \cdot 10^4$  с, составляло  $\Delta\epsilon \sim 10^{-9}$ . Измерения проводились при постоянной температуре  $40 \pm 0,02^\circ\text{C}$ .



Временные зависимости отношения неупругой части деформации к упругой при приложении *a* и снятии *б* нагрузки для образца из стали 40ХНЮ (упругая деформация  $\epsilon_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ ): 1 – предварительная пластическая деформация  $\epsilon_{II} = 0$ , 2 –  $\epsilon_{II} = 1 \cdot 10^{-3}$ , 3 –  $\epsilon_{II} = 5 \cdot 10^{-3}$ . На вставках: I – схема нагружения образца, II, III – временные зависимости в логарифмическом масштабе

В экспериментах с отожженными образцами стали ( $T_{\text{отж}} = 950 \text{ К}$ ) приложение постоянной нагрузки вплоть до предела текучести вызывало только упругую деформацию. Эффекты последействия на уровне  $\Delta\epsilon \sim 10^{-9}$  не наблюдались. После того, как образцы подвергались пластической деформации величиной  $\epsilon_{\text{н}} > 1 \cdot 10^{-3}$ , их реакция на приложение постоянной нагрузки изменялась. Появлялось упругое последействие, имеющее релаксационный характер. На рис. а приведены зависимости отношения неупругой части деформации к упругой  $\epsilon_{\text{н}}/\epsilon_{\text{у}}$  от времени, прошедшего с момента нагружения образца, для различных значений предварительной пластической деформации. Максимальное значение отношения  $\epsilon_{\text{н}}/\epsilon_{\text{у}}$  в пределах точности измерений не зависело от величины  $\epsilon_{\text{у}}$  при изменении  $\epsilon_{\text{у}}$  от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$ . В этом смысле можно говорить о линейности неупругой деформации. Такой результат позволяет делать количественные оценки из экспериментов по изгибу образцов, когда деформация не является однородной в объеме образца.

При снятии нагрузки, когда напряжение в образце резко уменьшалось до нуля и в дальнейшем не менялось, также наблюдалась релаксация деформаций, однако изменение неупругой части за время от 10 до  $3 \cdot 10^4$  с оказалось меньшим, чем при нагружении (см. рис. б). При этом проведение нескольких циклов нагружения–разгрузки образца показало отсутствие накопления остаточной деформации из-за несимметрии изменения деформации в процессе нагружения и разгрузки. По-видимому, при разгрузке образца выравнивание неупругой части деформации происходило в более ранние времена ( $t < 10$  с). Таким образом, полностью восстанавливалось состояние образца после деформирования, хотя наблюдался гистерезисный характер временной зависимости неупругой деформации.

Аналогичные результаты были получены при деформировании алюминиевого сплава Д16. В нем так же возникала релаксирующая деформация после предварительного пластического деформирования образцов. Она не наблюдалась в отожженных образцах. Различие между сталью и алюминием состояло в величине неупругой части деформации, а также в характере временной зависимости.

Полученные временные зависимости неупругой деформации не описываются стандартной релаксационной формулой  $\epsilon_{\text{н}} \sim (1 - \exp -t/\tau)$  с одним временем релаксации  $\tau$ . На вставке рис. а, б те же кривые изображены в логарифмическом масштабе по времени. Видно, что временная зависимость неупругой части деформации на временах от 10 до  $10^4$  с хорошо описывается логарифмическим законом. Это свидетельствует о том, что соответствующие процессы, обуславливающие релаксацию деформации, имеют широкий спектр времен релаксации вплоть до времен  $t \sim 3 \cdot 10^4$  с. Для алюминия зависимость  $\epsilon_{\text{н}}(t)$  несколько отличается от логарифмической, указывая на более узкое распределение времен релаксации вблизи  $\tau \sim 10^3$  с. Обнаруженные неупругие эффекты должны также проявляться в динамических экспериментах через увеличение внутреннего трения при периодических деформациях, однако в этом случае их трудно исследовать, поскольку неупругим деформациям, полученным в настоящем эксперименте, соответствует вносимое затухание:

$$Q^{-1} \approx \frac{\pi}{2\epsilon_{\text{у}}} \frac{d\epsilon_{\text{н}}}{d \ln(t)} \approx 10^{-4},$$

что при измерениях на частотах  $\omega \approx \tau^{-1}$  близко или ниже уровня фона для динамических экспериментов<sup>1</sup>. Зависимость от степени предварительной пластической деформации и отжига указывает на дислокационную природу неупругих явлений, наблюдаемых в представленных экспериментах. Существует ряд моделей движения дислокаций в поле точечных дефектов, предложенных для описания процессов пластического деформирования и ползучести твердых тел, происходящих при больших напряжениях<sup>3</sup>. Однако они ограничиваются довольно общими представлениями, поскольку в этих случаях происходит изменение дефектной струк-

туры образца, которое трудно учесть. Приведенные результаты показывают, что процесс неупругого деформирования при низких напряжениях обладает широким спектром времен релаксации. Это говорит в пользу механизмов термоактивированных переходов дислокационных сегментов между метастабильными состояниями <sup>4</sup>.

Авторы благодарят Брагинского В.Б. за внимание к работе и ценные обсуждения.

#### Литература

1. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975.
2. Брагинский В.Б. УФН, 1988, 156, 93.
3. Судзуки Т. и др. Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир, 1989.
4. Винокур В.М., Обухов С.П. ЖЭТФ, 1989, 95, вып. 1, стр223.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
24 апреля 1990 г.