

УДК 539.376

©1994

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ЭФФЕКТОВ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ КВАЗИСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.П.Митрофанов, К.В.Токмаков

Проведено исследование обратимой ползучести в предварительно пластически деформированных образцах из алюминиевого сплава при напряжениях, меньших макроскопического предела текучести. Зависимость неупругой части деформации от времени t , прошедшего с момента нагружения, при $t > 80$ S можно аппроксимировать логарифмической функцией. Обнаружено, что скорость релаксации деформации медленно уменьшается с течением времени, прошедшего с момента пластической деформации. После отжига образца релаксация не наблюдается. Обсуждается связь этих эффектов с внутренним трением в материале.

В последнее время исследователи проявляют интерес к механическим колебательным системам с большим периодом собственных колебаний. Такие колебательные системы применяются в сверхчувствительных измерительных устройствах, используемых, например, в гравитационных экспериментах. К ним, в частности, относятся различные типы физических маятников с периодом колебаний до 10^4 S [1,2]. Упругий элемент такого маятника представляет собой тонкую металлическую пластинку, в которой создаются изгибные деформации. Одним из требований, предъявляемых к этим устройствам, являются малые потери энергии или высокая механическая добротность Q . Для того чтобы выяснить, чем ограничена добротность таких колебательных систем, необходимо определить физические механизмы рассеяния энергии при деформациях упругого элемента. В диапазоне низких частот важную роль играет дислокационная неупругость [3]. Подвижность дислокаций при деформировании твердых тел контролируется внутрикристаллическими барьерами, в роли которых выступает либо сама кристаллическая решетка, либо дефекты или примеси. В зависимости от условий, например амплитуды и частоты внешних напряжений, возможны как силовые, так и термоактивационные механизмы преодоления барьеров дислокациями. Вопрос об относительном вкладе каждого из механизмов, а также об амплитудно-частотной зависимости внутреннего трения и дефекта модуля Юнга, которые формируются в этих условиях, пока остается открытым [4].

Для исследования неупругости твердых тел широко используются динамические методы, такие как метод внутреннего трения или метод измерения гистерезисных петель нагрузка-неупругая деформация [4].

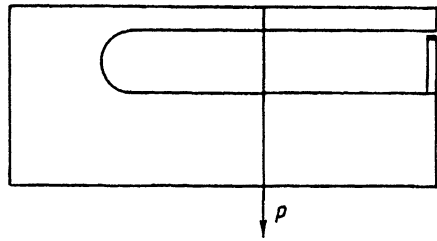


Рис. 1. Конструкция образца и схема его нагружения для исследования неупругой деформации.

Квазистатические методы обычно используются для изучения необратимой дислокационной деформации.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования неупругих эффектов, возникающих в пластически деформированных образцах промышленного алюминиевого сплава Д-16, полученные квазистатическим методом. Ранее неупругие эффекты наблюдались квазистатическим методом в сплаве 40ХНЮ [5]. Исследовалась обратимая ползучесть в консольных пластинках, изгибаемых под воздействием постоянной нагрузки, приложенной к образцу. Существенным является то, что приложенные напряжения не превышали макроскопического предела текучести материала, поэтому после снятия нагрузки происходил возврат деформации и образец восстанавливал свое состояние, т.е. наблюдалась неупругая релаксация его деформации.

Образцы имели форму, изображенную на рис. 1. Геометрические размеры рабочей части: длина 50 мм, ширина 10 мм, толщина 2 мм. Образец устанавливался на плоском горизонтальном основании. Нагружение осуществлялось с помощью груза, подвешенного на нити к консоли в ее средней части. В момент освобождения арретиров, поддерживающих груз, к образцу прикладывалась постоянная нагрузка, равная весу груза. Деформация образца регистрировалась с помощью емкостного датчика, измеряющего перемещение конца консоли. Его чувствительность обеспечивала разрешение по смещению $5 \cdot 10^{-9}$ м или $3 \cdot 10^{-9}$ по деформации. В настоящем варианте использовался пассивный термостат, поскольку проводились относительно короткие серии измерений. При нагружении в образце создавалась неоднородная деформация, которая рассчитывалась по известным формулам. Поэтому приводимая в тексте и на рисунках величина деформации соответствует средней абсолютной величине деформации, создаваемой в образце при его изгибе.

Перед серией измерений образец предварительно деформировался изгибом при комнатной температуре, так что максимальная величина остаточной пластической деформации составляла $\sim 2 \cdot 10^{-2}$. Затем он вставлялся в измерительный блок, проводилось его нагружение и регистрировалось изменение деформации с течением времени. Полная деформация образца состояла из двух частей: упругой части ϵ_{el} , которая равнялась $\sim 4 \cdot 10^{-4}$, и неупругой части ϵ_{an} , представляющей собой обратимую ползучесть. При снятии нагрузки также наблюдалось мгновенное уменьшение упругой части деформации, а затем постепенное уменьшение полной деформации до исходного состояния образца. В пределах точности измерений остаточные деформации не регистри-

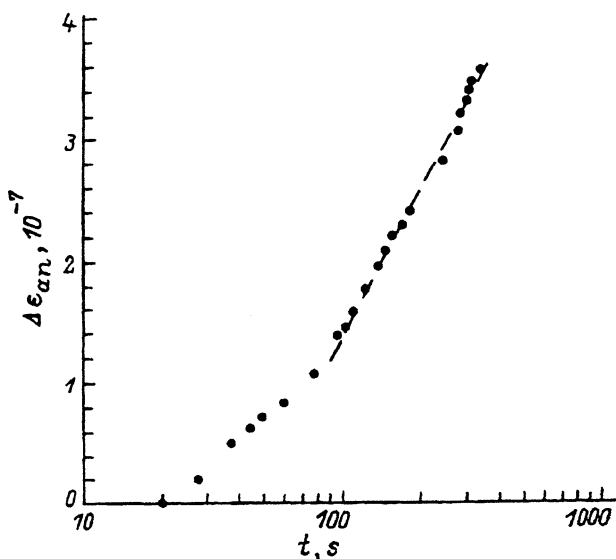


Рис. 2. Зависимость изменения неупругой деформации $\Delta \epsilon_{an}$ от времени. Упругая часть деформации $\epsilon_{el} \approx 4 \cdot 10^{-4}$.

ровались. Таким образом, на одном и том же образце можно было многократно снимать кривую ползучести.

На рис. 2 изображена зависимость изменения деформации нагруженного образца от времени, прошедшего с момента нагружения. В логарифмическом масштабе по оси времени на временах $t > 80$ s она может быть аппроксимирована прямой линией. Такой характер поведения неупругой части деформации позволяет использовать величину логарифмической производной $(\epsilon_{el})^{-1} d\epsilon_{an}/d(\ln t)$, вычисленную на определенном интервале времени относительно момента нагружения образца, в качестве меры величины неупругого эффекта.

Если теперь регистрировать изменение этой величины в зависимости от времени, прошедшего с момента, в который производилась предварительная пластическая деформация образца, то получим за-

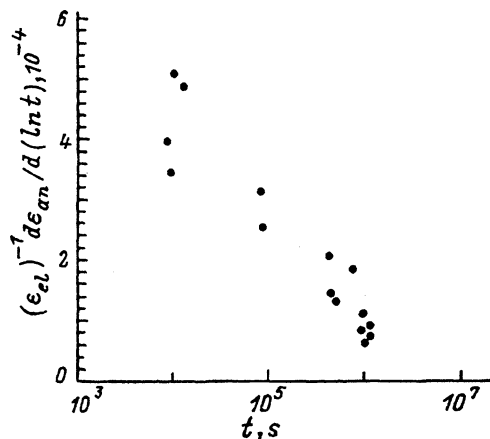


Рис. 3. Зависимость скорости релаксации деформации от времени, прошедшего с момента создания пластической деформации $\epsilon_{pl} \approx 2 \cdot 10^{-2}$ в образце.

зависимость (рис. 3). Несмотря на довольно большой разброс данных, можно предполагать, что эта зависимость близка к логарифмической на временном интервале $10^3 - 10^6$ с. Отжиг образца в течение нескольких часов при температуре около 400°C приводил к практически полному исчезновению (на уровне чувствительности аппаратуры) неупругого эффекта деформирования в образце.

Наблюдаемое в эксперименте поведение образцов при их деформации представляет собой типичный процесс неупругой релаксации деформации и может быть описано в рамках стандартной теории неупругой релаксации [6]. Измеренная временная зависимость неупругой деформации указывает на то, что процесс характеризуется не одним временем релаксации, а широким спектром времен релаксации. В этом случае неупругая часть деформации дается следующим выражением:

$$\varepsilon_{\text{ан}}(t) = \int_{\tau_0}^{\tau_{\infty}} f(\ln \tau) [1 - \exp(-t/\tau)] d(\ln \tau), \quad (1)$$

где функция $f(\ln \tau)$ представляет собой релаксационный спектр при постоянном напряжении. Существуют приближенные соотношения, позволяющие получить релаксационный спектр процесса из экспериментально измеренной величины ползучести материала [6]

$$f(\ln \tau) \approx d\varepsilon_{\text{ан}}(t)/d(\ln t) \Big|_{t=\tau}. \quad (2)$$

Логарифмической зависимости функции ползучести от времени соответствует спектральная плотность распределения релаксационного процесса, обратно пропорциональная времени релаксации $f(\tau) \sim 1/\tau$.

Такой же вид функции распределения получен в работе [1] при измерении инфранизкочастотного внутреннего трения в упругих элементах, изготовленных из закаленной бериллевой бронзы. Указанный вид релаксационного спектра дает частотно-независимое внутреннее трение в материале упругого элемента.

Поскольку неупругие деформации наблюдались нами в предварительно деформированных образцах и исчезали при их отжиге, то можно предположить, что они связаны с движением дислокаций. Тот факт, что дислокационное внутреннее трение в области низких частот слабо зависит от частоты, отмечался многими авторами [6,7]. Этот факт относится как к амплитудно-зависимому, так и к амплитудно-независимому внутреннему трению. Его необходимо учитывать при построении моделей, описывающих дислокационное внутреннее трение.

Учитывая взаимосвязь явлений релаксации деформации и внутреннего трения, естественно связать наблюдаемое уменьшение со временем скорости релаксации в исследованных образцах алюминиевого сплава с эффектом Кестера, заключающимся в уменьшении со временем внутреннего трения в предварительно пластически деформированных образцах [6], который, как полагают, обусловлен закреплением дислокаций благодаря миграции к ним точечных дефектов, возникающих в процессе пластической деформации.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что квазистатический метод исследования неупругих деформаций с использованием обратимой ползучести может дать полезную информацию о взаимодействии дислокаций с центрами закрепления для того, чтобы уточнить механизмы такого взаимодействия.

Авторы благодарят В.Б.Брагинского и Н.А.Тяпунину за полезное обсуждение.

Список литературы

- [1] Quinn T.J., Speake C.C., Brown L.M. // *Phil. Mag. A.* 1992. V. 65. N 2. P. 261-276.
- [2] Saulson P.R., Stebbins R., Dumont F., Mock S. // *Preprint SU-GP-92/12-1.* Syracuse University, Syracuse, USA, 1992. 16 p.
- [3] Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М., 1985. 254 с.
- [4] Голяндин С.Н., Кустов С.Б. // *ФТТ.* 1992. Т. 34. № 12. С. 3771-3778.
- [5] Биленко И.А., Митрофанов В.П., Охрименко О.А. // *Письма в ЖЭТФ.* 1990. Т. 51. № 10. С. 532-535.
- [6] Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М., 1975. 472 с.
- [7] Кустов С.Б., Голяндин С.Н., Никифоров А.В., Кардашев Б.К. // *ФТТ.* 1989. Т. 31. № 2. С. 260-263.

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступило в Редакцию
12 ноября 1993г.