

05.1;07;12

©1993 г.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ СУБМИКРОСЕКУНДНОМ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Ю.В. Судьенков, Ю.Б. Никитин

Исследования упругопластических процессов в металлах при коротких $\lesssim 10^{-7}$ с импульсах нагружения к настоящему времени весьма немногочисленны и фрагментарны [¹⁻³], а влияние структуры практически не исследовались.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния исходной структуры железа (О.ЗЖР), никеля (Н1) и алюминиевого сплава (Д16) на изменение механизмов пластического течения при субмикросекундном ударном нагружении.

Ударное нагружение осуществлялось плоской ударной волной длительностью $8 \cdot 10^{-8}$ с, создаваемой при лазерном воздействии на тонкий полгошающий слой, находящийся в акустическом контакте с образцом содной стороны и оптическим окном с другой. Такая схема генерации позволяла возбуждать импульсы давления до 2 ГПа. Использовалась лазерная установка с $\lambda = 1.06$ мкм и $\tau = 25 \cdot 10^{-9}$ с. Для обеспечения плоскостности ударного нагружения перед зоной облучения ($\varnothing 8-10$ мм) устанавливался диффузно-рассеивающий экран.

Измерение импульсов давления производилось пьезокерамическим датчиком, работающим в режиме генератора тока. Калибровка датчика, а также ряд контрольных измерений осуществлялись лазерным интерферометром со стабилизированной чувствительностью и фотоэлектронным счетом полос. Погрешность измерений давления была не хуже 5% при временном разрешении $3 \cdot 10^{-9}$ с.

Исходную структуру исследуемых металлов изменяли вакуумным отжигом образцов в диапазоне от 50 до 1100° С с часовой выдержкой при заданной температуре и медленным остыванием вместе с печью.

В образцах измерялись размер зерна (d), микротвердость (H) и, по стандартной методике, определялись статические диаграммы $\sigma - \epsilon$.

Динамические исследования проводились на образцах различной толщины (2-10 мм), что позволило определить затухание упругого предвестника и, соответственно, величину упругого предела Гюгонио (σ_y). Данные о пределе упругости, скорости упругой и пластической волн дали возможность построить динамические диаграммы $\sigma - \epsilon$, а измерения H после ударного нагружения позволили определить упрочнение (ΔH) в образцах с различной исходной структурой для всех исследуемых металлов.

Как известно, изменение твердости и упругого предела Гюгонио отражает общий вклад исходной структуры и микроструктуры

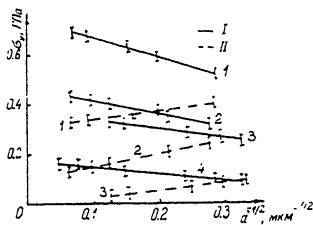


Рис. 1. 1 — железо 0.3ЖР, 2 — никель Н1, 3 — алюминиевый сплав Д16, 4 — медь МРО из [11], I — ударное нагружение, II — квазистатические испытания.

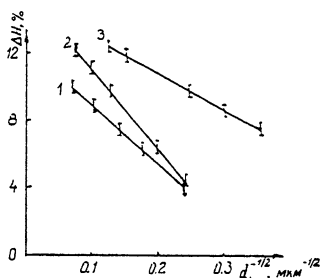


Рис. 2. 1 — железо 0.3ЖР, 2 — никель Н1, 3 — алюминиевый сплав Д16.

ры, возникшей в результате деформации, в механические свойства металлов. При квазистатических испытаниях изменение этих величин определяется, в основном, сопротивлением скольжению дислокаций, а зависимости их от размера зерна описываются соотношением типа Холла-Петча [4]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_0 — сопротивление матрицы ($\sigma_y = \sigma_0$ при $d \rightarrow \infty$); K — коэффициент пропорциональности.

Это соотношение выполняется и при динамических испытаниях вплоть до длительностей $\gtrsim 10^{-6}$ с [5].

На рис.1 и 2 представлены зависимости $\sigma_y(d^{-1/2})$ и $\Delta H(d^{-1/2})$, полученные в наших исследованиях. Оказалось, что для обеих зависимостей соотношение (1) не выполняется. Наибольшие значения σ_y и ΔH наблюдаются при максимальных d и уменьшаются с уменьшением d . Обнаруженные особенности, по-видимому, обусловлены сменой механизмов деформации, вносящих определяющий вклад в механические свойства металлов после субмикросекундного нагружения.

Как установлено к настоящему времени [4,5], понижение температуры и увеличение скорости деформации способствуют развитию двойникования и подавлению скольжения, а значение критических напряжений двойникования практически не зависят от температуры. При этом двойникование существенно облегчается с ростом d .

d , мкм		20	40	200		20	40	220
Δc_1		116	157	120		23	30	147
Δc_2	Fe	260	105	231	Ni	38	14	23
Δn		80	20	10		11	3	1

Анализ этих факторов с учетом принципов температурно-временного соответствия [7] позволяет предположить, что определяющим механизмом пластического течения в крупнозернистых образцах при нагружениях $\lesssim 10^{-7}$ с является двойникование. Критическое напряжение двойникования и определяет σ_y , а увеличение плотности двойников — ΔN в этих образцах. Это подтверждается и результатами работы [7], в которой отмечается определяющий вклад тонких двойников в упрочение сплава Cu-8.7Ge при ударном нагружении с длительностью $\sim 7 \cdot 10^{-8}$ с.

Снижение σ_y и ΔN с уменьшением размера зерна, когда затрудняется процесс двойникования, по-видимому, обусловлено межзерненным механизмом пластического течения, интенсивность которого возрастает с увеличением объемной плотности границ. При этом межзерненный механизм включает как процессы межзерренного скольжения, так и ротационные процессы [8,9].

Для определения вклада ротационного механизма были проведены тщательные измерения продольной скорости звука в образцах с разным размером зерна. Скорости измерялись вдоль и поперек направления распространения ударной нагрузки как до, так и после нагружения. Точность измерений была не хуже 0.1%. Эти измерения с учетом известных значений скорости в кристаллографических направлениях максимальной анизотропии [10] позволили оценить эффективное число зерен (Δn), изменивших кристаллографическую ориентацию после ударного нагружения, следствием чего и явилось изменение скорости звука в образцах.

В таблице представлены результаты измерений и проведенной оценки Δn . Наблюдается увеличение Δn при уменьшении размера зерна и увеличении объемной плотности границ. При этом значительный рост Δn наблюдается при значениях $d \lesssim \tau_\phi \cdot c$, где $\tau_\phi \cdot c$ — пространственный размер фронта ударной нагрузки (в нашем случае ~ 40 мкм). При этих размерах зерна межзерненный механизм пластического течения становится определяющим в релаксации внешних напряжений, что подтверждается также практически полным отсутствием ударного упрочнения поверхности образцов с $d \lesssim 40$ мкм.

Здесь Δc_1 — разница скорости звука до и после ударного нагружения вдоль направления распространения ударного импульса; Δc_2 — то же для ортогонального направления.

В заключение отметим, что обнаруженные особенности динамического отклика металлов на субмикросекундное нагружение обусловлены, на наш взгляд, во-первых, “вымораживанием” механизма скольжения и преобладающей ролью двойникования в процессе пластического деформирования металлов с крупным размером зерна $d > \tau_\phi \cdot c$; во-вторых, ростом эффективности межзерненного механизма пластического течения с уменьшением размера зерен

и увеличением объемной плотности границ, который становится определяющим при масштабах структуры, сравнимой с масштабом максимальных градиентов внешней нагрузки.

Список литературы

- [1] Хоглов Н.П., Иванов А.Г., Минеев В.Н. // Физика горения и взрыва. 1981. В. 1. С. 129-132.
- [2] Жиряков Б.М., Малинин В.Г., Обеснюк В.Ф. // Проблемы прочности. 1986. № 3. С. 56-59.
- [3] Аверин В.И., Громов Б.И., Ерофеев В.М. и др. // Изв. АН СССР. 1991. Т. 55. В. 7. С. 1404-1408.
- [4] Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. и др. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Киев: Наукова думка, 1989. 256 с.
- [5] Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. Мейерс М.А., Мурр Л.Е. М.: Metallurgia, 1984. 512 с.
- [6] Larouche S., Mikkola D.E. // Scripta Met. 1978. V. 12. P. 543-547.
- [7] Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975. 472 с.
- [8] Мещеряков Ю.И., Отрощенко С.А., Васильков В.Б., Чернышenko А.И. Препринт Ленинградского филиала ин-та Машиноведения АН СССР. 1990. № 51. С. 45.
- [9] Дисклинации и ротационная деформация твердых тел. Л.: Тр. ФТИ АН СССР, 1990. 225 с.
- [10] Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули металлов и неметаллов. Киев. Наукова думка, 1982. 285 с.
- [11] Судьенков Ю.В., Байзаков О.Д. // Проблемы прочности. 1991. No 9. С. 79-81.

Санкт-Петербургский
государственный
университет

Поступило в Редакцию
28 апреля 1993 г.

