

05;07;08;12

Опико-акустическая спектроскопия изменений структуры металлов вследствие пластической деформации ударом субмикросекундной длительности

© Ю.В. Судьенков, З.А. Сажко

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: spm@unicorn.math.spbu.ru

(Поступило в Редакцию 31 мая 2002 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований структурных перестроек в металлах, произошедших вследствие упругопластического деформирования ударом субмикросекундной длительности. Исследовались образцы железа (0.3ЖР) и никеля (Н1) с различной исходной структурой. Изменения структуры после ударных испытаний изучались методом опико-акустической спектроскопии. Полученные частотные зависимости продольной скорости звука и коэффициентов затухания позволили оценить как различие характерных масштабов структурных изменений в зависимости от исходной структуры образцов, так и высокую чувствительность опико-акустического метода к структурным перестройкам в материалах.

Взаимосвязь процессов пластической деформации материалов и перестройки их структуры хорошо известна [1–4]. Однако информация о характерных масштабах структурных уровней, определяющих процесс деформирования в тех или иных условиях нагружения в зависимости от исходной структуры материала, достаточно ограничена. Это связано с недостаточным развитием методов исследования структурных перестроек в процессе деформирования и достаточно ограниченным количеством комплексных экспериментальных исследований, особенно при ударных испытаниях.

При исследовании упругопластического деформирования металлов импульсами субмикросекундной длительности было обнаружено [5], что зависимости упрочнения от размера зерна значительно отличаются от описываемых соотношением Холла–Петча. Анализ результатов позволил предположить, что это связано с изменением масштабных уровней перестройки структуры, определяющих пластическую деформацию в образцах с различной исходной структурой.

Для анализа масштабов происходящих изменений нами была проведена акустическая спектроскопия до и после ударного нагружения образцов железа 0.3ЖР и никеля Н1 с разной исходной структурой. Ударное воздействие осуществлялось импульсами давления ~ 1.0 GPa и длительностью $\sim 8 \cdot 10^{-8}$ s [5]. Исходную структуру образцов изменяли часовым отжигом в вакууме при заданной температуре и медленным остыванием вместе с печью.

Для получения частотных зависимостей затухания и скорости ультразвука в широком спектральном диапазоне был использован импульсный опико-акустический метод [6–8]. Применялся лазер с длительностью импульса излучения 25 ns, длиной волны $1.06 \mu\text{m}$, энергией ≤ 30 mJ.

Акустические импульсы регистрировались пьезоприемником из ПВДФ пленки толщиной $30 \mu\text{m}$, размещенного на поверхности опико-акустической ячейки из

плавленого кварца, которая выполняла функции опического тракта и акустического волновода [9]. Полоса пропускания пьезоприемника была порядка 150 MHz.

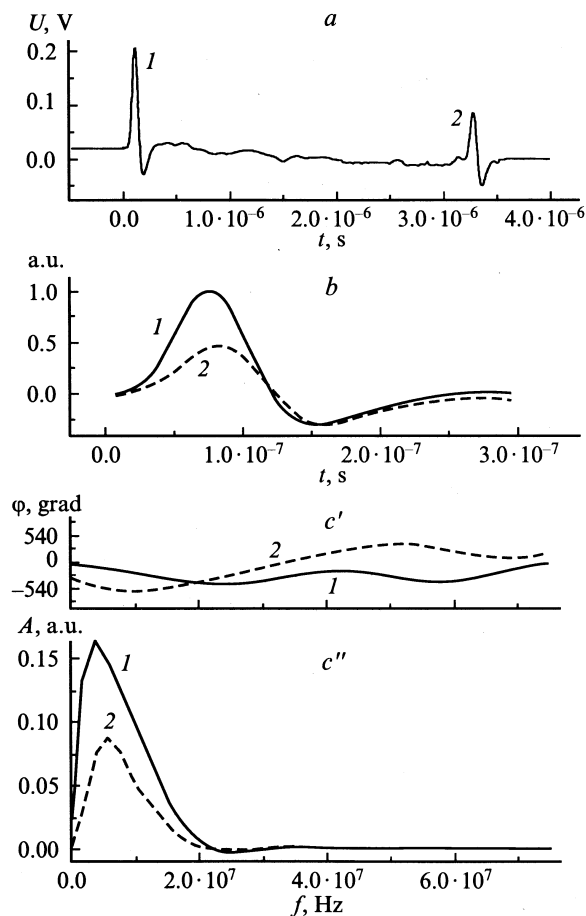


Рис. 1. *a* — осциллограмма акустических импульсов в железе (отжиг 100°C); *b* — 1-й и 2-й импульсы; *c* — фурье-спектры 1-го и 2-го акустических импульсов: *c'* — фаза, *c''* — модуль.

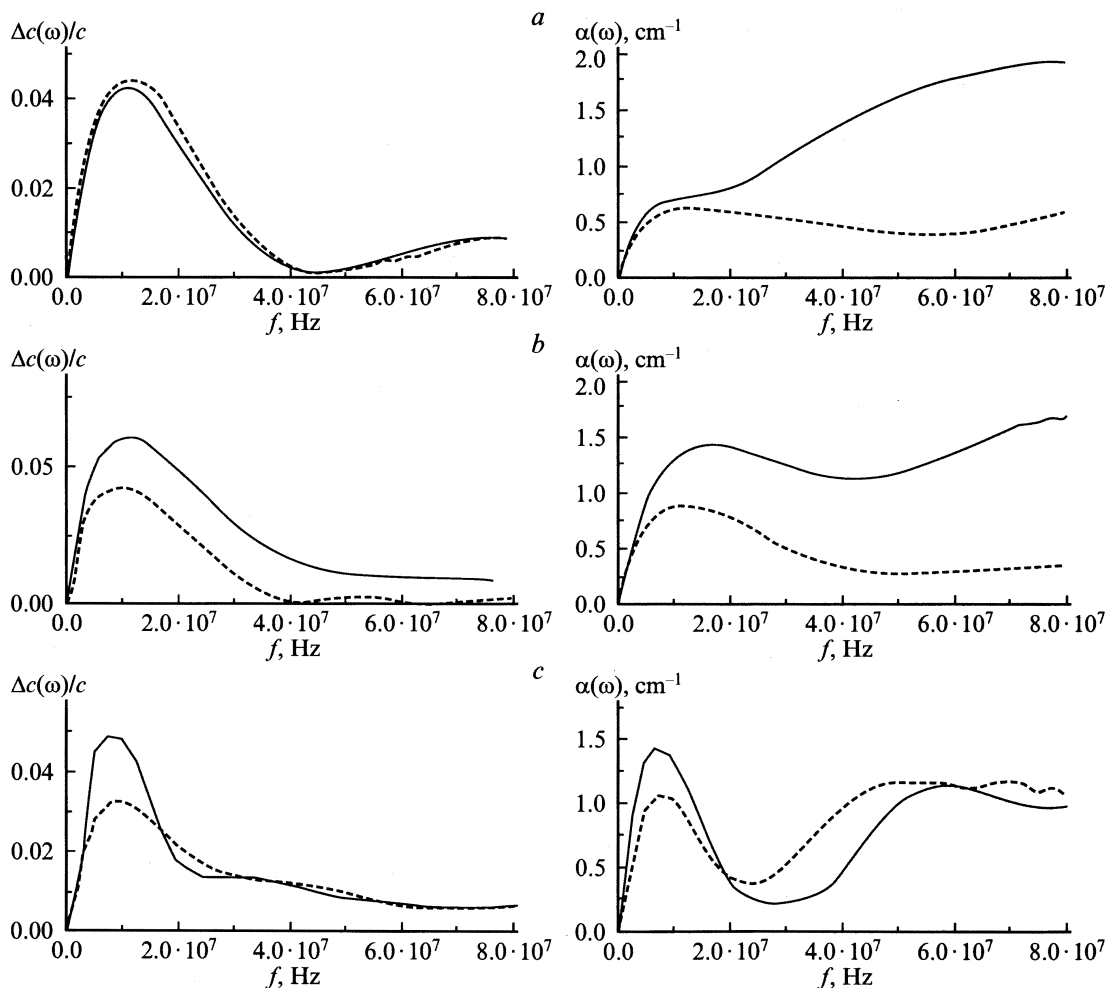


Рис. 2. Частотные зависимости скорости звука $\Delta c(\omega)/c_0$ и затухания $\alpha(\omega)$: *a* — отжиг 1000°C ($d \sim 20 \mu\text{m}$); *b* — отжиг 700°C ($d \sim 20 \mu\text{m}$); *c* — отжиг 100°C ($d \sim 220 \mu\text{m}$); штриховая линия — до удара, сплошная — после удара.

На рис. 1 представлены типичная осциллограмма акустических эхоимпульсов в образце железа (отжиг 100°C), совмещенные первый (1) и второй (2) акустические импульсы, а также приведены модули и фазы их фурье-спектров.

В экспериментах измерялись скорости распространения акустических импульсов (c_0), а также из анализа их спектров определялись зависимости скорости $c(\omega)$ и затухания $\alpha(\omega)$ от частоты (ω) по соотношениям [8]

$$\Delta c(\omega) = \frac{c_0}{\omega \Delta x} \left[\arctg \frac{B_1}{A_1} - \arctg \frac{B_2}{A_2} \right],$$

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{2\Delta x} \ln \frac{A_1^2 + B_1^2}{A_2^2 + B_2^2},$$

где $c(\omega) \approx c_0 + \Delta c(\omega)$; Δx — толщина образца; $A_{1,2}, B_{1,2}$ — коэффициенты при действительной и мнимой составляющих фурье-спектра первого и второго акустических импульсов.

На рис. 2 приведены рассчитанные таким образом частотные зависимости скорости звука и затухания до и

после ударного нагружения образцов железа, отожженных при $1000, 700$ и 100°C . Анализ изменений этих зависимостей позволяет оценить масштабы структурных перестроек, произошедших в образцах в результате ударного нагружения.

В образцах, отожженных при 1000°C , с размером зерна $d \sim 220 \mu\text{m}$ и достаточно низкой плотностью дислокаций зависимости $\Delta c(\omega)/c_0$ и после удара практически не отличаются во всем частотном диапазоне. Скорость звука при этом остается неизменной $c_0 = 5948 \pm 5 \text{ m/s}$. Затухание, не отличаясь до частот $\leq 25 \text{ MHz}$, после удара значительно возрастает в высокочастотной области спектра вследствие возросшей при пластическом деформировании плотности линейных дефектов (дислокации, двойники) с характерным масштабом таких структурных изменений порядка $\sim 10^{-7} - 10^{-6} \text{ m}$ [1–4]. По-видимому, это и определило максимальное деформационное упорядочение образцов с такой исходной структурой [5].

В образцах со структурой, полученной отжигом при 700°C ($d \sim 20 \mu\text{m}$), после ударного нагружения происходит заметное увеличение дисперсии скорости

$\Delta c(\omega)/c_0$ и затухания $\alpha(\omega)$ во всем частотном диапазоне. Скорость звука возрастает от значения 5956 до 5974 м/с в нагруженных образцах. Это различие в 3 раза превышает погрешность измерений. Такие изменения обусловлены кристаллографической переориентации зерен или их фрагментов с характерным масштабом $\sim 10^{-6}$ – 10^{-5} м в результате действия ротационного механизма пластической деформации [2–4]. Следствием этого является и рост затухания в частотном диапазоне ≤ 25 МГц за счет рассеяния звука на границах фрагментов и межзеренных границах. Возросшее после удара затухание в высокочастотной области спектра обусловлено, как и в предыдущем случае, увеличением плотности линейных дефектов. Таким образом, для исходной структуры железа, полученной отжигом при 700°C, вклад в пластическую деформацию вносят как ротационные механизмы, так и изменения дефектной структуры зерен.

В образцах, отожженных при 100°C, с $d \sim 20 \mu\text{m}$, но с более высокой исходной плотностью дефектов после ударного нагружения наблюдается существенный рост $\Delta c(\omega)/c_0$ и $\alpha(\omega)$ только в области частот ≤ 25 МГц. Скорость звука возрастает на 24 м/с от значения $c_0 = 5966 \pm 5$ до $c_0 = 5990 \pm 5$ м/с в нагруженных образцах. В высокочастотной области спектра отличие дисперсии скорости и затухания до и после удара незначительны. Такой характер изменения зависимостей $\Delta c(\omega)/c_0$ и $\alpha(\omega)$ обусловлен, по-видимому, тем, что для образцов с данной исходной структурой ротационный механизм пластического течения с характерным масштабом изменений структуры порядка размера зерна становится определяющим.

Результаты исследования образцов никеля Н1 качественно полностью совпадают с результатами представленными на рис. 2 для железа.

Таким образом, в поликристаллах с размером зерна порядка размера фронта ударной нагрузки ($\sim 10^{-5}$ м) ротационный механизм является определяющим пластическое деформирование при субмикросекундном ударе. При этом отметим, что по результатам работы [5] в таких образцах деформационное упрочнение минимально.

Полученные результаты в совокупности с результатами работы [5] показывают также, что нарушение соотношения Холла–Петча (увеличение упрочнения с ростом размера зерна) обусловлено определяющим вкладом перестройки внутриверенной дефектной структуры (увеличением плотности дислокаций и двойников) в деформационное упрочнение. В случае субмикросекундного ударного нагружения этот эффект максимально реализуется в крупнозернистых образцах и, по-видимому, в монокристаллах.

Также отметим эффективность и перспективность оптико-акустического метода спектроскопии для исследований структурных изменений в материалах. Применение его позволяет получать информацию о структурных изменениях с масштабами $\geq 10^{-7}$ – 10^{-6} м.

Список литературы

- [1] Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Металлургия, 1984. 512 с.
- [2] Вопросы теории дефектов в кристаллах. Л.: Наука, 1987. 176 с.
- [3] Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Киев: Наукова думка, 1989. 256 с.
- [4] Дисциплинация и ротационная деформация твердых тел. Л.: ФТИ, 1990. 226 с.
- [5] Судьенков Ю.В., Никитин Ю.Б. // Письма ЖТФ. 1993. Т. 9. Вып. 12. С. 66–69.
- [6] Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 352 с.
- [7] Меркулов А.Г., Токарев В.А. // Дефектоскопия. 1970. № 4. С. 1–11.
- [8] Бондаренко А.Н. Лазерные методы возбуждения и регистрации акустических сигналов. М.: Изд-во стандартов, 1989. 118 с.
- [9] Судьенков Ю.В., Никитин Д.Ю. // Сб. тр. X сессии Российского акустического общества. Т. 2. М.: Геос, 2000. С. 345–348.