

05; 07

© 1990 г.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЗЕРЕН, ИНИЦИИРУЕМЫЕ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ

*С. А. Атрошенко, В. Б. Васильков, Ю. И. Мецераков,
Г. Г. Савенков, А. И. Чернышенко*

С помощью высокоразрешающей лазерной интерферометрии ударно нагружаемых плоских мишеней, изготовленных из различных типов конструкционных материалов (сталь 4, сталь 45, сталь 40X, сталь 30XН4М, алюминиевый сплав АМг-6 и др.) выявлены колебательные движения зерен в процессе прохождения переднего и заднего фронтов упругоэластического импульса микросекундной длительности. Характер колебаний зерен различен в разных материалах. На основе зарегистрированных осциллограммы колебаний зерен проведен расчет динамической вязкости, контролирующей эти колебания. Делается вывод, что динамическая вязкость стали 45 определяется вязкостью межзеренного скольжения. Металлографический анализ образцов после ударного нагружения подтвердил этот вывод — картина рельефа на свободной поверхности мишеней в точности совпала с картиной зеренной структуры этого материала. В то же время в других материалах динамическое деформирование при данных длительностях нагружения осуществляется по всему объему зерна. При этом колебания зерен в таких материалах не возбуждаются.

Экспериментально исследован отклик поликристаллических материалов на ударное воздействие, которое осуществляли в условиях одноосной деформации на пневматической пушке калибра 37 мм. Образцы были выполнены в виде плоских шайб диаметром 52 мм и толщиной 3—5 мм. Толщина пластины ударника колебалась в пределах 1.2—1.35 мм, что соответствовало длительности импульса давления в пределах 0.45—0.55 мкс. Скорость ударника варьировали в пределах 150—400 м/с. В качестве материала мишеней были взяты существенно отличающиеся по своим механическим свойствам конструкционные материалы, обладающие различным размером зерна, массовой плотностью и квазистатическими характеристиками прочности: сталь 4, сталь 45, сталь 40X, сталь 30XН4М и алюминиевый сплав Д-16.

Для непрерывной регистрации временных профилей скорости свободной поверхности мишеней использовали лазерный дифференциальный интерферометр. Последний мог настраиваться таким образом, чтобы диаметр зондирующего луча на свободной поверхности мишени был либо больше, либо соизмерим с размером зерна исследуемого материала. В первом случае интерференционный сигнал определялся суммарным откликом всех зерен, попадающих в пределы лазерного пятна на мишени, в то время как во втором — откликом единичного зерна. Система фокусировки лазерного луча обеспечивала минимальные размеры последнего в пределах 70—80 мкм, при расфокусировке этот размер возрастал примерно до 350—400 мкм. Средний размер зерна в исследуемых материалах указан в таблице.

Испытания выявили качественно и количественно различный характер регистрируемого интерференционного сигнала в зависимости от того, одно или

Марка материала	Размер зерна, мкм
Сталь 4	104
Сталь 45	113.76
Сталь 40X	29.7
Сталь 30XН4М	—
Сплав АМг-6	40.3

множество зерен охватывает зондирующий луч интерферометра. Для иллюстрации сказанного на рис. 1, *a*, *б* показаны интерферограммы скорости свободной поверхности, полученные при ударном нагружении двух образцов стали 45. В первом случае луч лазера был сфокусирован до размера 70 мкм, так что регистрировался динамический отклик отдельного зерна, в то время как во втором случае поперечный размер луча составил 350 мкм, охватывая несколько десятков зерен. Прежде всего обращает на себя внимание явно выраженный колебательный характер интерференционного сигнала в первом случае. Сопоставление интерферограммы с импульсом скорости свободной поверхности мишени показывает, что ударные возбуждения сигнала соответствуют

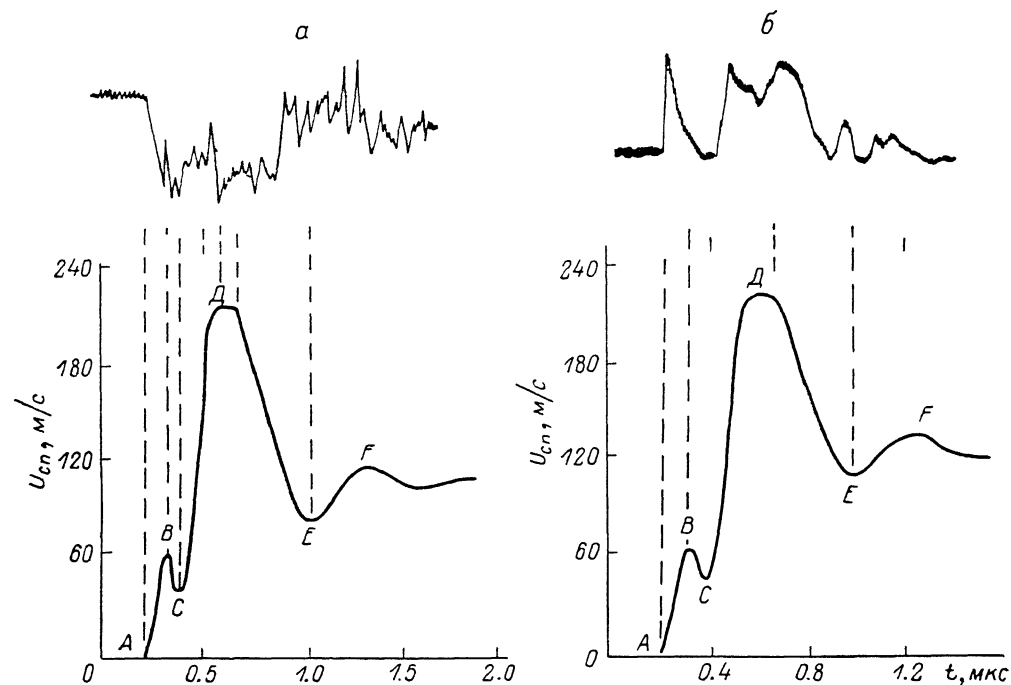


Рис. 1. Интерферограммы и соответствующие им временные профили скорости свободной поверхности мишеней из стали 45 при наличии осцилляций (*a*) (скорость ударника 207 м/с) и без осцилляций (*б*).

Постоянная интерферометра 150 (*a*) и 100 м/с (*б*).

изменениям знака ускорения на профиле средней скорости частиц или же моментам резких перепадов скорости. Так, первое колебание появляется, как правило, в начале упругого предвестника (точка *A* на рис. 1, *a*). Второе и третье ударные возбуждения происходят в точках *B* и *C*, которые соответствуют началу и окончанию области релаксации непосредственно за упругим предвестником и в которых происходит изменение знака ускорения частиц: вслед за упругим предвестником скорость частиц в данном материале начинает падать, а с началом пластического фронта нарастать. Четвертое ударное возбуждение осцилляций (точка *D*) соответствует вершине импульса, где также имеет место смена знака ускорения частиц. Наконец, пятое и шестое возбуждения на представленной интерферограмме соответствуют изменениям знака ускорения в откольной части заднего фронта импульса (в большинстве опытов в процессе ударного нагружения был реализован тыльный откол).

Для представленного на рис. 1, *a* импульса период осцилляций составляет 32–36 нс, а начальная амплитуда при очередном возбуждении колеблется в пределах 30–50 м/с. Так как при увеличении размера лазерного луча на мишени осцилляции на интерференционном сигнале исчезают (рис. 1, *б*), можно заключить, что колебательные движения зерен имеют случайные фазы, вследствие чего при их взаимодействии с лазерным лучом происходит потеря кон-

трастности интерференционного сигнала. Таким образом, для одного и того же материала различные условия регистрации его отклика на импульсное нагружение либо выявляют, либо теряют информацию о колебаниях зерен, возбуждаемых при смене знака ускорения проходящего импульса. Опыты с разными материалами показали, что они по-разному проявляют склонность к колебательным движениям зерен, хотя условия нагружения, регистрации и фокусировки лазерного луча на мишень оставались неизменными. В частности, осцилляции не удалось зарегистрировать в алюминии и его сплавах, а также в стали 30ХН4М. Для сравнения на рис. 2 показаны интерферограмма и соответствующий ей импульс скорости свободной поверхности, полученные для сплава АМГ-16, в сходных условиях нагружения и регистрации. Видно, что интерференционный сигнал представляет собой картину биений, адекватно описывающих изменение средней скорости свободной поверхности, и на нем отсутствуют высокочастотные осцилляции, характерные для стали 4 и стали 45. Аналогичная картина наблюдается и для стали 30ХН4М. Промежуточное положение занимает сталь 40Х, в которой ударное возбуждение зерен носит аperiodический характер. Вследствие этого при смене знака ускорения на профиле импульса скорости имеют место резкие перепады интерференционного сигнала, не переходящие, однако, в колебания.

После ударного нагружения на свободной поверхности образцов из стали 45 появляется характерный рельеф, который представляет собой плоские участки с попереч-

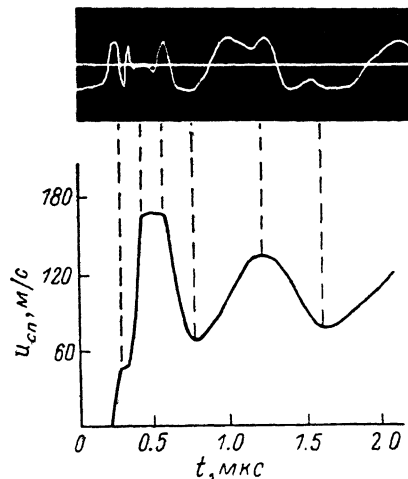


Рис. 2. Интерферограмма и соответствующий временной профиль скорости свободной поверхности мишени из сплава АМГ-6, нагруженной со скоростью 212 м/с.

Постоянная интерферометра 84,5 м/с.

ными размерами 100—150 мкм, разделенные замкнутой сеткой узких возвышенных участков (типа «горных хребтов»). Типичная фотография свободной поверхности после динамического деформирования образца стали 45, полученная с темнопольным объективом, показана на рис. 3, а. На рис. 3, б для сравнения представлена металлографическая картина зеренной структуры стали 45, соответствующая внутренним областям мишени. Из сопоставления этих фотографий видно, что сетка «хребтов» на свободной поверхности мишени идентична внутренней сетке границ зерен как по своим размерам, так и по конфигурации. Таким образом, можно заключить, что динамическое деформирование стали 45 в исследуемом диапазоне скоростей нагружения и длительностей импульсов осуществляется в основном за счет проскальзывания по границам зерен. Этот вывод подтверждается приведенным ниже расчетом динамической вязкости, который был осуществлен на основе зарегистрированных осциллограмм затухающих колебаний зерен. Эти колебания описываются уравнением осциллятора с трением

$$\ddot{u} + 2n\dot{u} + \omega_0^2 u = 0, \quad (1)$$

где u — смещение осциллятора из положения равновесия, $2n = b/m$, b — коэффициент вязкого трения, m — масса осциллятора, ω_0 — частота колебаний, n — коэффициент затухания.

На основе данных интерферометрических измерений можно определить логарифмический декремент затухания (как отношение двух последовательных наибольших отклонений осциллятора от положения равновесия), который связан с коэффициентом затухания n и периодом колебаний T соотношением

$$\delta = \exp(nT).$$

Для представленной на рис. 1, a интерферограммы $\delta=3$ и период колебаний $T=36$ нс. На основе данных металлографии (см. таблицу) средний размер зерна в стали 45 составляет 113 мкм, откуда $m=4.1 \cdot 10^{-9}$ кг. Тогда коэффициент затухания в соответствии с выражением (2) равен $3.1 \cdot 10^7$ с $^{-1}$. Это значение много меньше собственной частоты колебаний $\omega_0=1.7 \cdot 10^8$ с $^{-1}$, в этом случае энергия системы убывает по закону [1]

$$E = E_0 \exp(-2nt). \quad (3)$$

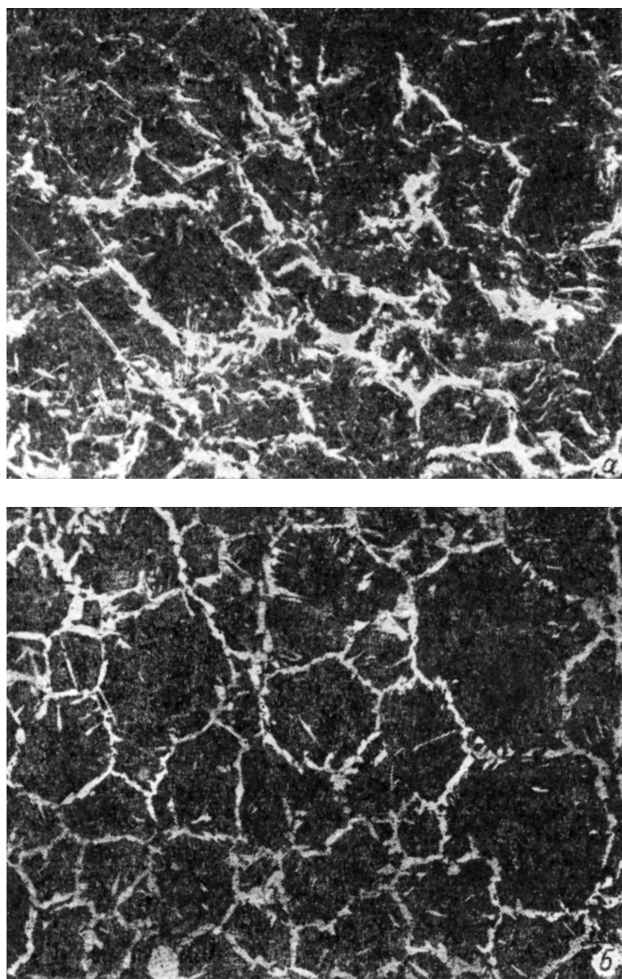


Рис. 3. Поверхности мишени из стали 45 после ударного нагружения, снятая темнопольным объективом (a), и зерновой структуры поперечного разреза ($\times 100$) (b).

Аналогично убывает запасенная упругая энергия вязко-упругого тела в модели Максвелла [2]

$$E = E_0 \exp(-2Gt/\mu). \quad (4)$$

где G — модуль сдвига, μ — динамическая вязкость.

Приравнявая выражения (3) и (4), получим

$$\mu = G/n. \quad (5)$$

В условиях эксперимента динамическая вязкость оказывается равной $2.7 \cdot 10^4$ П, что с большой точностью совпадает со значением μ , опубликованным в работе [3], где приведена средняя по объему образца вязкость, равная

$2.3 \cdot 10^4$ П. Отсюда можно сделать вывод, что динамическая вязкость в исследуемом диапазоне скоростей нагружения определяется в основном вязкостью межзеренных границ.

Как показано в работах [4, 5], другой характеристикой, описывающей внутреннюю подвижность элементов структуры относительно друг друга, является ширина распределения частиц по скоростям. В этой связи было бы интересно сопоставить данные по измерению ширины распределения частиц по скоростям, свойственные тому или иному материалу, со склонностью этого материала к возбуждению колебаний зеренной структуры при импульсном нагружении. С этой целью одновременно с регистрацией средней скорости свободной поверхности в каждом опыте определяли максимальное значение ширины распределения частиц по скоростям. Количественная информация о ширине распределения может быть извлече-

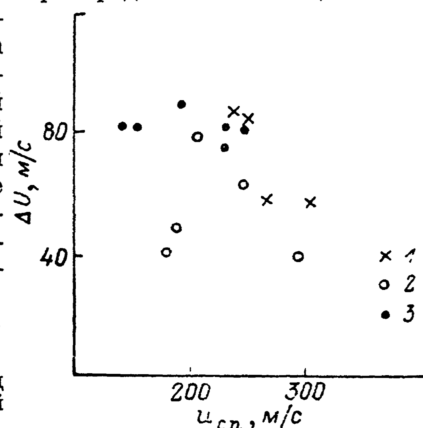


Рис. 4. Зависимости ширины распределения частиц по скоростям от скорости нагружения для сталей 4 (1), 45 (2), 40X (3).

чена из контрастности интерференционного сигнала [5]. Ширина распределения ΔU связана с контрастностью I соотношением

$$I = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\pi\Delta U}{v_{\text{ин}}}\right)^2\right], \quad (6)$$

где $v_{\text{ин}} = \lambda_0 / (2\tau_0)$ — постоянная интерферометра, характеризующая изменение скорости свободной поверхности при изменении числа биений интерференционного сигнала на единицу; λ_0 — длина волны лазерного излучения; τ_0 — время задержки в плече интерферометра.

Данные по измерению ширины распределения по скоростям для некоторых материалов представлены на рис. 4. Видно, что ширина распределения для различ-

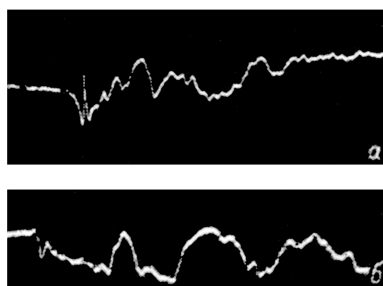


Рис. 5. Интерферограммы скорости свободной поверхности для стали 4, полученные при скоростях нагружения 236 (а) и 264 м/с (б).

ных материалов с изменением скорости нагружения меняется неодинаково. Так, для стали 40X максимальная ширина распределения по скоростям мало изменяется во всем диапазоне скоростей нагружения, проведенном в настоящей работе, в то время как для стали 4 и 45 при некоторой скорости имеется экстремум. Сопоставление данных о ширине распределения с данными об осцилляциях зерен показывает, что наибольшая амплитуда колебаний имеет место для такой скорости нагружения, которой как раз соответствует максимум на кривой $\Delta U = f(u_{\text{сн}})$. В качестве примера на рис. 5 представлены две интерферограммы скорости свободной поверхности, полученные для одинаковых мишеней из стали 4 при скоростях нагружения 236 и 264 м/с и одинаковых условиях регистрации интерференционного сигнала. Видно, что амплитуда осцилляций больше для первого случая, которому как раз соответствует большая ширина распределения частиц по скоростям (рис. 4).

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментально показано, что при импульсном нагружении поликристаллических материалов могут возбуждаться колебания зерен, по времени совпадающие с моментами изменения знака ускорения частиц на временном профиле импульса.

2. Колебания зерен имеют максимальную амплитуду при таких скоростях нагружения, которым соответствует максимальная ширина распределения частиц по скоростям.

Список литературы

- [1] Ландау Л. Я., Лифшиц Е. М. Механика. М.: Наука, 1988. 216 с.
- [2] Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. Л.: Наука, 1972. 424 с.
- [3] Степанов Г. В. Поведение конструкционных материалов в упругопластических волнах нагрузки. Киев: Наукова думка, 1978. 110 с.
- [4] Диваков А. К., Козанчик Л. С., Мещеряков Ю. И., Мышляев М. М. // ПМТФ. 1987. Вып. 3. С. 135—143.
- [5] Мещеряков Ю. И., Диваков А. К., Кудряшов В. Г. // Физика горения и взрыва. 1988. № 2. С. 126—134.

Ленинградский филиал
института машиноведения
им. А. А. Благонравова АН СССР

Поступило в Редакцию
5 января 1989 г.
