

- [4] Канаев И. Ф., Малиновский В. К. ДАН СССР, 1982, т. 266, № 6, с. 1367—1370.
 [5] Чабан А. А. Письма в ЖЭТФ, 1986, т. 43, № 2, с. 74—75.
 [6] Пуговкин А. В., Серебренников Л. Я., Шандаров С. М. Изв. вузов. Физика, 1974, № 3, с. 106—112.
 [7] Ефанов В. И., Коваленко Е. С. В кн.: Акустооптические и акустоэлектронные устройства радиоэлектронных систем. Л.: Изд-во ФТИ, 1985, с. 117—129.
 [8] Шандаров С. М. Там же, с. 108—116.
 [9] Балакиш В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
 [10] Стурман В. И. ЖТФ, 1978, т. 48, № 5, с. 1010—1020.

Томский институт
 автоматизированных систем управления
 и радиоэлектроники

Поступила в Редакцию
 23 февраля 1987 г.

УДК 531.3 : 536.66

Журнал технической физики, т. 58, в. 3, 1988

О СВЯЗИ МИКРО- И МАКРОХАРАКТЕРИСТИК ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Ю. И. Мещеряков

Эксперименты по динамическому деформированию и разрушению материалов свидетельствуют о неоднородном характере протекания этих процессов на микроуровне [1]. Использование новых методов диагностики волновых процессов, в частности лазерной интерферометрии, позволило установить, что движение материала в волнах нагрузки происходит в виде совокупности микропотоков частиц среды в направлении распространения волны, причем каждому из них свойственна своя массовая скорость частиц [2, 3]. Интерферометрический метод позволяет за один акт импульсного нагружения материала регистрировать не только временной профиль средней скорости свободной поверхности ударно-нагружаемых мишеней, но и получать количественные данные о ширине функции распределения микропотоков по скоростям — сугубо микроскопическую характеристику динамического деформирования материала.

К настоящему времени проведены дополнительные микроструктурные исследования сплава Д-16, подвергнутого динамическому нагружению в тех же условиях, что и в [2, 3]. Исследования показали, что поперечный размер микропотоков определяется расстоянием между включениями примесей или выделениями второй фазы. На фрактограмме (рис. 1, а) видны продольные трещины, отделяющие соседние микропотоки и располагающиеся как раз в местах выделения второй фазы. На нижней фрактограмме (рис. 1, б) видны также турбулентные следы, разделяющие область однородного деформирования материала и совпадающие с направлением распространения волны. Турбулизация среды при динамическом деформировании на включениях примесей или второй фазы по своей физической природе аналогична турбулизации жидкости с помощью специальных решеток, устанавливаемых поперек потока жидкости в опытах по определению характеристик турбулентности [4]. Как известно, переход жидкости из ламинарного течения в турбулентное приводит к снижению сопротивления вязкой среды при обтекании погруженных в нее тел. При этом режим течения зависит от скорости потока, масштаба турбулентности, вязкости и плотности среды и характеризуется безразмерной величиной, называемой числом Рейнольдса

$$Re = \rho Lu/\mu, \quad (1)$$

где ρ — плотность, u — массовая скорость, L — характерный масштаб, μ — вязкость. В теории турбулентности показано [4], что при некоторых значениях перечисленных выше параметров течения инерционные силы турбулентных вихрей могут уравниваться вязкими силами. В этом случае энергетический обмен между микропотоками, разделенными зонами турбулентности, пренебрежимо мал. В выражении (1) масштабный фактор может быть определен непосредственно из фрактограммы рис. 1, б. Этой фрактограмме соответствует массовая скорость частиц 150 м/с, плотность материала 2.7 г/см³, диаметр турбулентного вихря ~10 мкм. Режиму равновесия между инерционными и вязкими силами, согласно (1), соответ-

стствует значение коэффициента вязкости ~ 40 Пз, что в точности совпадает с данными, приведенными в [5] и полученными независимыми экспериментами при той же скорости деформирования близкого по своим характеристикам материала. Такое совпадение подтверждает тот факт, что при этих скоростях деформации 10^4 — 10^5 с $^{-1}$ микропотоки, разделенные полосами турбулентности, перемещаются более или менее независимо относительно друг друга.

С позиций микрокинетики пластического деформирования можно представить следующую модель неоднородного деформирования материала при динамическом нагружении. Внутри каждого микропотока деформирование осуществляется за счет движения дислока-

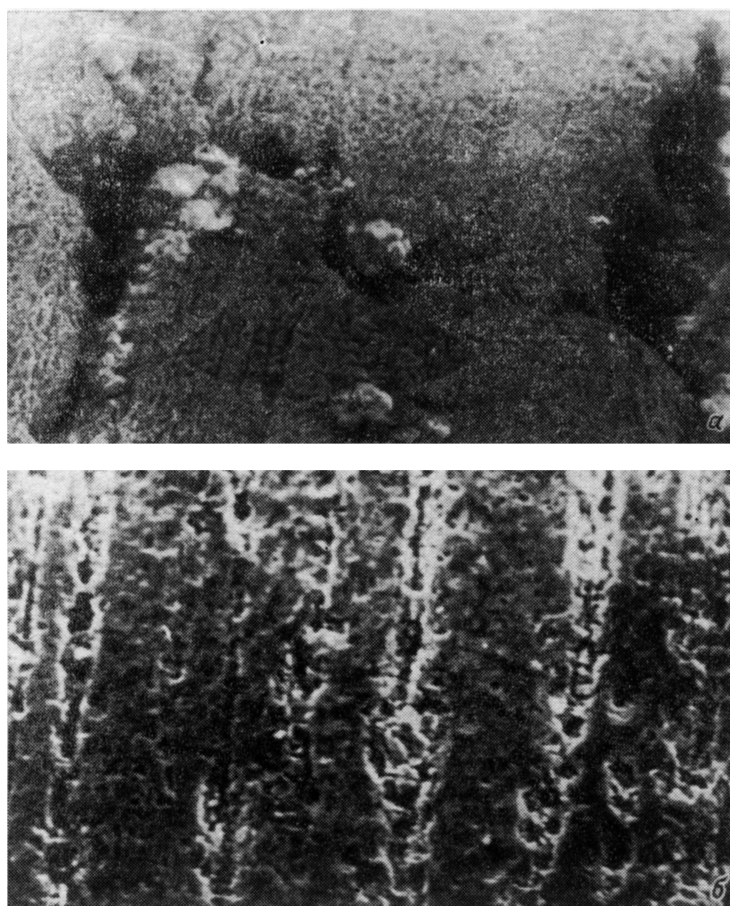


Рис. 1. Участок откольной щели с выделениями второй фазы в сплаве Д-16 (а) и следы проскальзывания микропотоков в направлении распространения волны (б).

ций, которые перемещаются в своих плоскостях скольжения к боковым границам микропотоков, подпитывая ротационные моды движения среды и тем самым облегчая проскальзывание соседних микропотоков относительно друг друга (согласно [6], активация ротационной моды пластического деформирования происходит за счет притока дислокаций из соседних областей).

Другим механизмом, обеспечивающим легкое проскальзывание микропотоков относительно друг друга, может быть переход границ микропотоков в особое высоковозбужденное структурно-неустойчивое состояние по типу механизма зернограницного проскальзывания в явлении структурной сверхпластичности металлов [7], согласно которому переход границ зерен в сверхпластическое состояние осуществляется под воздействием бомбардировки их решеточными дислокациями. В литературе также обсуждается возможность неоднородного течения материала при динамическом нагружении как следствие локальных разогревов в местах пониженной вязкости из-за скопления подвижных дислокаций [8].

Скоростная неоднородность динамического деформирования оказывает непосредственное влияние на процессы динамического разрушения материалов. Это влияние должно в пер-

вую очередь сказываться на величине откольной прочности. При наличии разброса динамических характеристик среды условия откола для каждого индивидуального микропотока выполняются на различном расстоянии от свободной поверхности мишени. Вследствие распределения микропотоков по скоростям откольная поверхность должна иметь рыхлую структуру, что в действительности и наблюдается. Иллюстрацией сказанному служит фотография поперечного сечения мишени (рис. 2), в которой реализован откол. Откольная щель имеет вид ступенчатой линии, у которой горизонтальные участки, расположенные на разной высоте, соединены вертикальными щелями, совпадающими с направлением распространения волны. Размер горизонтальных участков откольной щели соответствует поперечному размеру микропотоков, в то время как вертикальные щели определяются разбросом микропотоков по скоростям. В серии специальных экспериментов по откольному разрушению сплавов Д-16, В-95 и АМг-6 установлено соответствие между величиной откольной скорости и шириной распре-

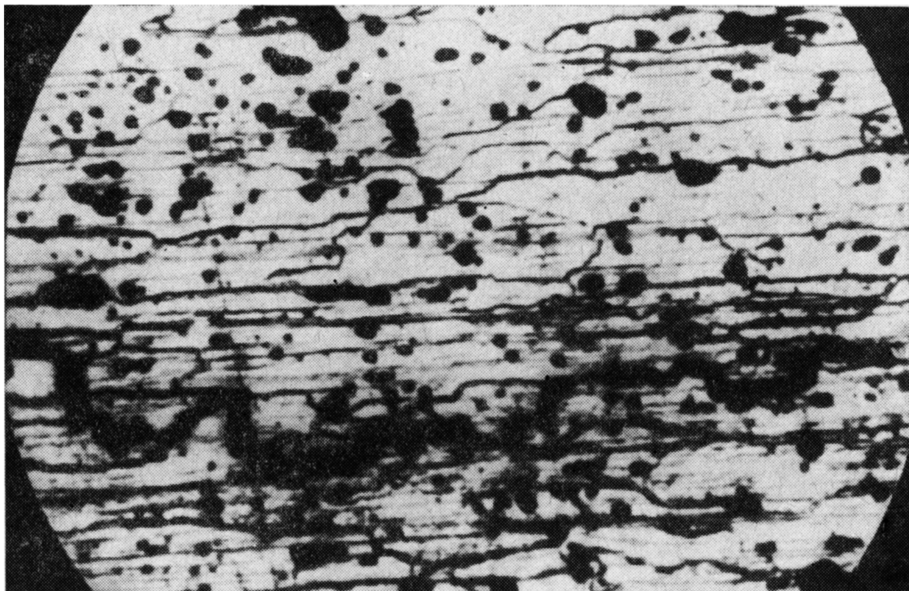


Рис. 2. Участок откольной щели в сплаве В-95.

ления микропотоков по скоростям. Из этих экспериментов, в частности, следует, что с увеличением ширины распределения микропотоков по скорости растет и величина откольной скорости. Это дает основание для включения ширины распределения в критерий откольной прочности материала.

При выводе критерия откольной прочности будем исходить по аналогии с [9] из баланса мощностей в зоне откола. При этом полагаем, что мощность в волне нагрузки расходуется на нормальный разрыв материала и на вязкое трение микропотоков относительно друг друга. Тогда условие баланса примет вид

$$\rho D u^2 = \frac{1}{2} \mu_1 \frac{u^2}{h} + \frac{1}{2} \mu_2 \frac{\Delta u u}{d}, \quad (2)$$

выражение слева характеризует мощность в волне нагрузки, ρ — плотность материала, D — скорость пластического фронта, u — массовая скорость частиц в волне. Первый член в правой части уравнения описывает мощность потерь за счет нормального разрыва микропотоков под действием растягивающего импульса напряжения в плоскости откола

$$P_1 = \frac{1}{2} \mu_1 \frac{u}{h} u, \quad (3)$$

где μ_1 — вязкость материала внутри микропотока; h — ширина зоны откола; u/h — скорость пластической деформации, связанной с движением поверхностей разрыва микропотоков.

в противоположные от откольной щели стороны. Наконец, второй член справа в (2) характеризует мощность потерь за счет проскальзывания микропотоков относительно друг друга

$$P_2 = \frac{1}{2} \mu_2 \frac{\Delta u}{d} u, \quad (4)$$

где μ_2 — вязкость материала между соседними микропотоками (для случая турбулентного течения в Д-16 эта вязкость была оценена выше), d — диаметр микропотока, $\Delta u/d$ — скорость пластической деформации сдвига по боковым поверхностям микропотоков.

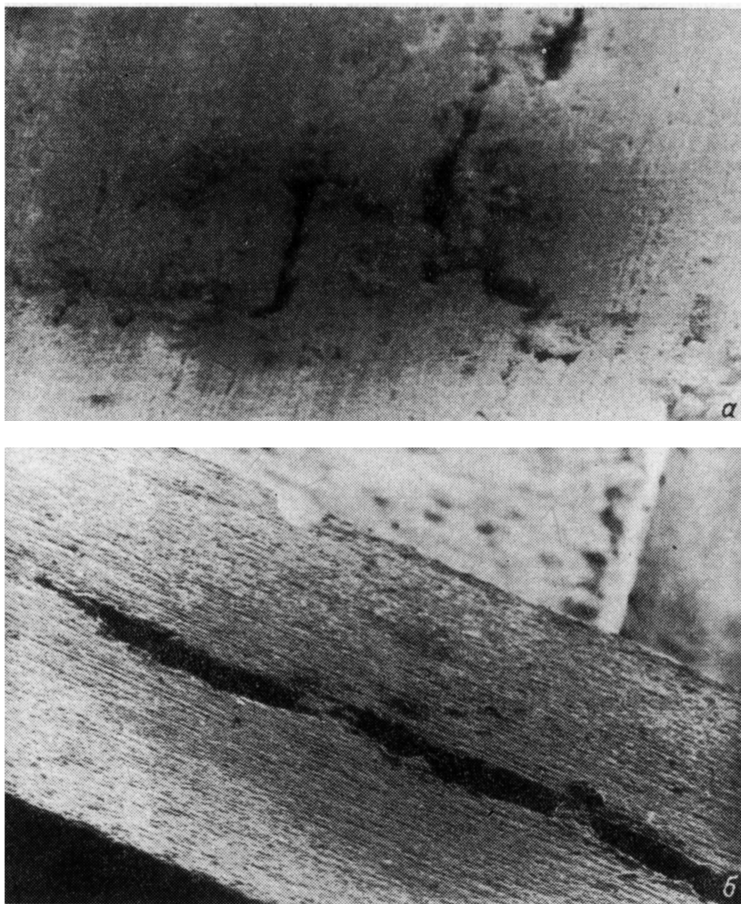


Рис. 3. Участки откольной щели в сплавах Д-16 (а) и АМг-6 (б).

Из уравнения (2) для ширины зоны откола имеем

$$h_1 = \left(\frac{2}{\mu_1} \rho Du - \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{\Delta u}{d} \right)^{-1} u. \quad (5)$$

Тогда характерное время откольного разрушения определится как

$$\tau = \left(\frac{2}{\mu_1} \rho Du - \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{\Delta u}{d} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\sigma = \rho Du$ — напряжение в волне нагрузки. Выражение (6) можно переписать в виде

$$\left(\frac{2}{\mu_1} \sigma - \frac{\mu_2 \Delta u}{\mu_1 d} \right) \tau = 1, \quad (7)$$

динамическое обобщение которого будет

$$\int_0^{\tau} \left(\sigma - \frac{\mu_2}{2} \frac{\Delta u}{d} \right) dt = \frac{\mu_1}{2}. \quad (8)$$

Это выражение можно рассматривать как импульсный критерий откольного разрушения, учитывающий распределение частиц по скоростям. Из выражения (6) следует, что характерное время откольного разрушения неограниченно возрастает, а критерий (8) не выполняется, когда $\sigma = \mu_2 \Delta U / 2d$, т. е. когда напряжение в волне нагрузки сравнивается с вязким напряжением проскальзывания микропотоков. Этот случай соответствует такой картине разрушения, в которой преобладают продольные щели, образованные при проскальзывании микропотоков. Фрактограмма поперечного разреза мишени с преобладанием такого типа микроразрушений показана на рис. 3, а. Она получена при динамическом нагружении сплава Д-16, обладающего настолько широким распределением микропотоков по скоростям, что величина дисперсии скорости частиц Δu соизмерима с самой величиной средней скорости. Противоположный случай (рис. 3, б) соответствует откольному разрушению сплава АМг-6, обладающего узким распределением частиц по скоростям ($\Delta U \simeq 0.1 u$).

Несмотря на то что полученный выше импульсный критерий откольной прочности является макроскопической характеристикой динамической прочности, в нем присутствуют и микроскопические величины — ширина распределения по скорости структурных элементов деформирования Δu и их размер d . Таким образом, в критерии (8) на статистическом уровне устанавливается связь между микро- и макрохарактеристиками откольного разрушения.

Литература

- [1] Мейер М. А., Мурр Л. Е. В кн.: Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Металлургия, 1984, с. 121—151.
- [2] Диваков А. К., Мецержаков Ю. И., Фадеев Л. П. ПМТФ, 1984, № 1, с. 123—127.
- [3] Мецержаков Ю. И., Диваков А. К. ЖТФ, 1985, т. 55, № 3, с. 591—595.
- [4] Хинце И. О. Турбулентность. М.: Физматгиз, 1963. 456 с.
- [5] Судьенков Ю. В., Филиппов Н. М., Недбай А. И. ЖТФ, 1981, т. 51, № 10, с. 2181—2187.
- [6] Владимиров В. И., Иванов С. Н., Приемский Н. Д. В кн.: Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986, с. 69—80.
- [7] Переверзнецов В. Н., Рыбин В. В. В кн.: Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986, с. 81—89.
- [8] Grady D. E., Asay G. R. J. Appl. Phys., 1982, v. 53 (11), p. 7350—7354.
- [9] Фадеев Л. П. В кн.: Динамические задачи механики сплошных сред. Новосибирск, 1977, в. 32, с. 95—122.

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

Поступило в Редакцию
26 февраля 1987 г.

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ZnSe : Te ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

О. В. Вакуленко, А. Н. Веретенников, В. Д. Рыжиков,
В. В. Чепелев

Монокристаллы группы A_2B_6 и в том числе ZnSe, используемые в качестве сцинтилляторов, в сравнении с традиционными детекторами ионизирующих излучений на основе щелочно-галогенидных кристаллов обладают рядом неоспоримых преимуществ [1], в частности устойчиво к повышенным радиационным нагрузкам, низким уровнем послесвечения.

Фотолюминесценция (ФЛ) монокристаллов ZnSe подробно рассматривалась в [2, 3]. Исследованию рентгенолюминесценции (РЛ) посвящены работы [4, 5]. Тем не менее вопросы химической природы центров излучения и механизмов излучательной рекомбинации остаются открытыми.

В настоящей работе исследована люминесценция монокристаллических образцов ZnSe : Te толщиной 5 мм при импульсном ($\tau_{\text{имп}} = 15$ нс) рентгеновском возбуждении. Измерительный стенд собран на базе светосильного монохроматора МДР-2. Линейно-перемещающее устройство, на котором крепился импульсный рентгеновский источник, позволяло исследовать РЛ при различных уровнях возбуждения, не изменяя при этом геометрии эксперимента.