

УДК 539.374

МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ В УСЛОВИЯХ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Г. Г. Савенков, Ю. И. Мещеряков*, Б. К. Барахтин, Н. В. Лебедева

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
190008 Санкт-Петербург, Россия

* Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург, Россия

E-mails: sav-georgij@yandex.ru, ym38@mail.ru, BBarakhtin@mail.ru, nad.L@rambler.ru

Представлены результаты экспериментов по ударно-волновому деформированию меди марки М2 в условиях одноосного нагружения. Методами световой, растровой и просвечивающей электронной микроскопии выявлены особенности механизмов деформации и разрушения меди при образовании откольной магистральной трещины. Определены параметры откольной прочности, поврежденности и самоподобия контура откольной трещины.

Ключевые слова: откольная прочность, самоподобие, фрактальная размерность.

Введение. При достижении критических условий ударно-волновое нагружение плоских твердых тел приводит к их откольному (динамическому) разрушению. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию теории динамического разрушения, эту область механики твердого тела нельзя считать полностью изученной, что во многом обусловлено сложностью физических процессов, происходящих в достаточно малых (по сравнению с размерами образца) зонах нагружаемого тела.

Откольное разрушение материалов, являющееся частным случаем динамического разрушения твердых тел, имеет ряд особенностей [1–4]:

- 1) высокая скорость деформирования;
- 2) стадийность процессов при ударно-волновом деформировании: в общем случае после сжатия материала (первая стадия процесса) происходят нагрев и изменение его структуры;
- 3) неоднородное в поле скоростей частиц материала движение материала в волнах нагружения (на первой стадии) и разгрузки;
- 4) большое количество разномасштабных дефектов, имеющих размеры от единиц до сотен микрометров (в том числе дефектов, образующихся в фазе ударно-волнового сжатия при поперечном сдвиге и расположенных перпендикулярно фронту волны [4]), вследствие распределения частиц материала по скоростям на первой стадии откола, что позволяет считать эти дефекты принадлежащими мезомасштабному структурному уровню [5];
- 5) реализация на второй стадии откола (растяжение) строго одномерной деформации, эквивалентной идеальному “стеснению” материала, практически не достижимому в статических условиях.

В общем случае распределение частиц материала по скоростям при сжатии и растяжении свидетельствует о неоднородности деформации в пространстве и времени. Неоднородность динамического деформационного процесса во времени (неустойчивость деформации) неоднократно наблюдалась на интерферограммах скорости свободной поверхности образцов [6]. При этом одним из проявлений неустойчивости при деформации и разрушении является возникновение самоподобных структур, основные характеристики которых сохраняются на различных масштабных уровнях и описываются в рамках теории фракталов [7]. Модель откольного разрушения с учетом указанной теории представлена в [8], в [9] приводятся данные о связи характеристик откола с фрактальной размерностью поверхности разрушения. В работе [8] показана важность учета функции распределения дефектов, образующихся в результате ударно-волнового нагружения, по размерам, а в [10] подчеркивается необходимость знания не только размера, но и формы и ориентации дефектов.

Целью настоящей работы является исследование физических механизмов динамического деформирования и разрушения крупнокристаллической меди, а также оценка морфологии повреждений в зоне откола и фрактальной размерности контура откольной щели. Характеристики меди, в том числе константы кинетических моделей откольного разрушения [11], хорошо известны [12]. Медь допускает большие пластические деформации как в квазистатических условиях нагружения, так и при повышенных скоростях деформации [13] и имеет небольшую сдвиговую прочность, что упрощает проведение экспериментов по ударному нагружению, поскольку в этом случае для разрушения образцов не требуются высокие скорости ударника. Кроме того, результаты определения фрактальной размерности в образцах из различных сталей [8, 9] показывают, что она изменялась существенно только в том случае, если скорости ударника различались не менее чем в два раза. Таким образом, представляет интерес изучение влияния пластических свойств меди на значения фрактальной размерности.

Исследуемый материал и методики проведения экспериментов. Ударное нагружение плоских образцов толщиной 5 мм и диаметром 52 мм, изготовленных из одного прутка высокопластичной меди марки М2 (предел прочности $\sigma_B = 220$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 140$ МПа, относительное удлинение образца после разрыва $\delta_5 = 58$ %, относительное сужение образца после разрыва $\psi = 88$ %, размеры зерен в образцах: $d_{\max} = 450$ мкм, $d_{\min} = 38$ мкм, $\langle d \rangle = (180 \pm 10)$ мкм), осуществлялось с помощью пневматической пушки калибром 30 мм при скоростях ударника $V_0 = 45 \div 400$ м/с. С помощью лазерного дифференциального интерферометра проводилось непрерывное (во времени) сканирование свободной поверхности образца, при этом регистрировались ее скорость, перепад скоростей в первом периоде колебаний ΔV , а также ширина распределения скоростей частиц материала свободной поверхности образца Δu и так называемый дефект скорости свободной поверхности δu [6, 13]. Далее ширину распределения скоростей Δu будем называть вариацией скоростей частиц. По соотношению

$$\sigma_p = 0,5\rho_0 C_0 \Delta V,$$

где ρ_0 — плотность материала образца; C_0 — объемная скорость звука в образце, рассчитывалась откольная прочность меди σ_p .

Исследования структуры меди выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов “Прометей” (Санкт-Петербург). По окончании ударного нагружения образцы разрезались по диаметру и выполнялась металлографическая шлифовка поверхности реза. Полученные шлифы подвергались детальному металлографическому анализу на световом микроскопе ММУ-9, электронном растровом микроскопе SEM 535 и просвечивающем электронном микроскопе УЭВМ-100.

С использованием методов металлографии выявлялись и измерялись микро- и мезодефекты, расположенные как параллельно свободной поверхности, так и перпендикулярно ей. Для дефектов округлой формы функции распределения строились отдельно. Поскольку дефекты представляли собой круглые или эллипсовидные поры (в некоторых случаях идентификация формы была затруднена), функция распределения имела вид $n/n_{\max} = f(S/S_{\max})$, где S_{\max} — максимальная площадь мезодефекта; n_{\max} — количество мезодефектов, соответствующих максимальной площади. Определение точного закона распределения с помощью статистических моментов различного порядка для каждого вида дефектов не проводилось.

Методом вертикальных сечений [14] по фотографиям структуры откольной щели с различным увеличением ($\times 12$, $\times 100$, $\times 1000$) на основе зависимости $D_f = \lg L / \lg N$ (L — протяженность контура выбранного участка щели; N — масштаб увеличения) определялась фрактальная размерность контура D_f .

Результаты экспериментов по ударному нагружению и их анализ. Результаты экспериментов по ударному нагружению приведены в таблице и на рис. 1.

Следует отметить, что в диапазоне скоростей ударника $V_0 = 117 \div 261$ м/с на кривой зависимости $\sigma_p = f(V_0)$ имеется участок в виде плато, на котором откольная прочность практически постоянна. Ранее при исследовании металлов с гранцентрированной кубической решеткой (сталь марки 12X18H10T и никелевый сплав ХН75ВМЮ) такого плато не наблюдалось [8]. Для этих металлов зависимости откольной прочности от скорости удара

Результаты экспериментов по ударному нагружению меди марки М2

V_0 , м/с	δu , м/с	Δu , м/с	σ_p , ГПа
44	3,000	0	0,57
62	0	1,6	0,82
94	2,220	11,5	0,85
117	-2,970	14,2	1,02
140	-3,600	13,6	1,03
177	10,500	22,4	1,06
184	0,234	14,4	1,19
189	3,360	28,2	1,00
261	28,570	49,4	1,01
388	0,420	75,7	1,28

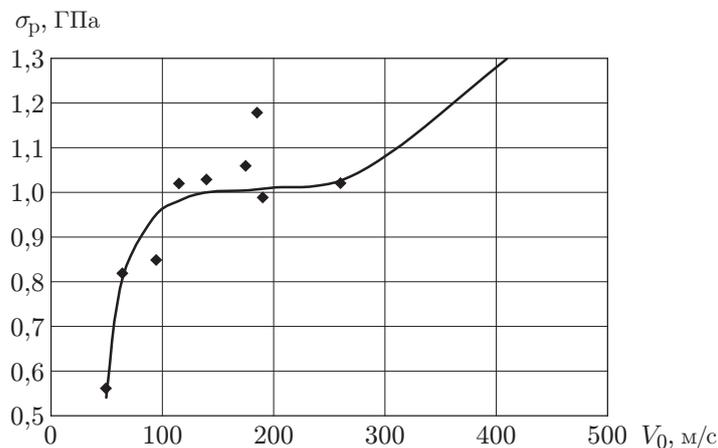


Рис. 1. Зависимость откольной прочности от скорости ударника

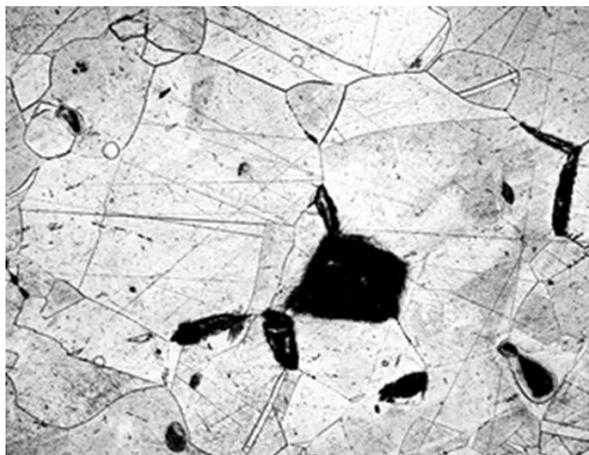


Рис. 2. Микроструктура образца после удара со скоростью $V_0 = 62$ м/с ($\times 100$)

имели немонотонный характер. В целом можно утверждать, что с увеличением скорости удара (и соответственно скорости деформации $\dot{\epsilon}$) откольная прочность меди увеличивается. Полученные сведения об откольной прочности не противоречат известным данным [15], кроме того, значения σ_p , полученные в настоящей работе, совпадают с данными [11].

Следует отметить, что в ряде случаев имеют место отрицательные значения дефекта скорости (см. таблицу). При этом уменьшается число колебаний сигнала на интерферограммах по сравнению с числом колебаний, соответствующим средней макроскопической скорости свободной поверхности. Данный факт свидетельствует о наличии на рассматриваемом участке образца-мишени, на который попал луч лазера диаметром 100 мкм, достаточно большого количества частиц, имеющих скорости, значительно превышающие среднюю скорость. Аналогично увеличивается локальная скорость частиц в мишенях из стали марки 30ХН4М и алюминиевого сплава Д16 [6]. Кроме того, анализ результатов, приведенных в таблице, показал, что зависимость дисперсии (вариации) скоростей частиц от скорости удара имеет немонотонный характер, несмотря на то что в большинстве случаев абсолютные значения дисперсии не превышают 5 % скорости удара (исключения составляют значения вариации при $V_0 = 177, 261$ м/с).

Результаты структурных исследований и их обсуждение. В результате ударного воздействия размер зерен в металле практически не изменился по сравнению с их размером в исходном состоянии. Форма зерен близка к равноосной. С увеличением скорости ударника в зернах появляются структурные элементы, ориентированные преимущественно под углом $40\text{--}45^\circ$ к направлению фронта нагружения, а также межзеренные трещины.

Следует отметить, что при скорости ударника $V_0 = 45$ м/с трещины малочисленны и их размер мал, но уже при скорости $V_0 = 62$ м/с продольные и поперечные оси несплошностей достигают размера 30×100 мкм (рис. 2), в дальнейшем трещины объединяются в крупномасштабные полости (откольные щели) (рис. 3).

Помимо кристаллографически ориентированных структурных элементов и межзеренных трещин различной конфигурации на поверхности микрошлифов образовывались дефекты округлой формы диаметром $30 \div 80$ мкм (рис. 4, а). Было сделано два предположения об их происхождении. Сначала предполагалось, что данные дефекты образовались в процессе металлургического производства. Однако детальное изучение исходной микроструктуры прутка, из которого были изготовлены образцы для испытаний, не выявило подобных дефектов. Затем было сделано предположение о наличии крупномасштабного пластического течения металла с локальными разворотами структурных элементов ма-

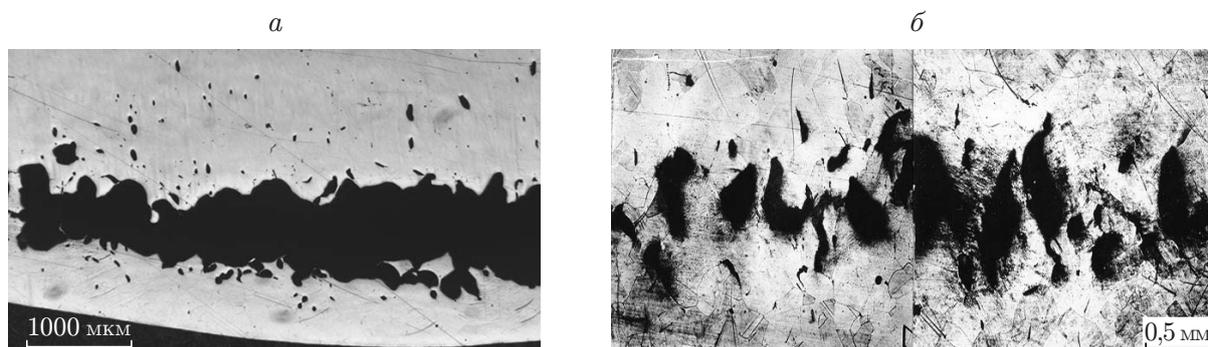


Рис. 3. Откольные щели, образовавшиеся после удара с различной скоростью:
a — $V_0 = 189$ м/с, *б* — $V_0 = 140$ м/с

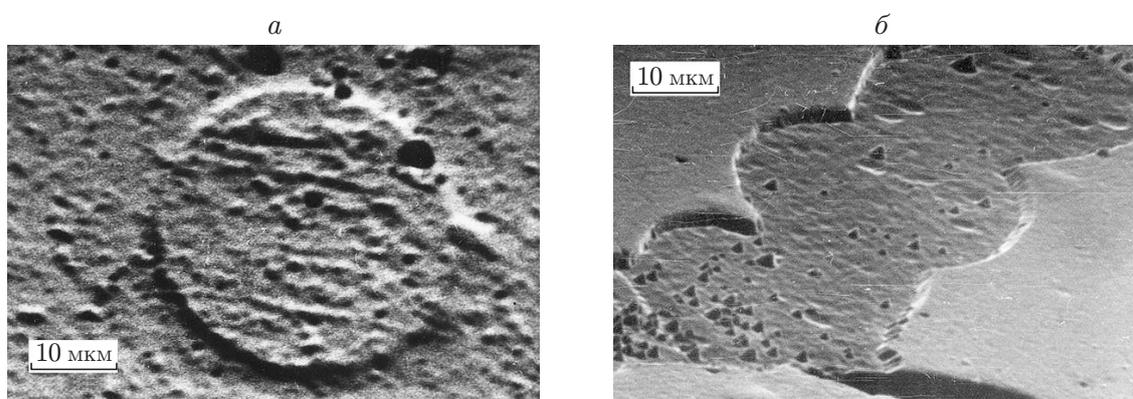


Рис. 4. Дефекты круглой формы, образующиеся при различных значениях скорости ударника:
a — $V_0 = 94$ м/с, *б* — $V_0 = 140$ м/с

териала мезоскопического масштаба. Предполагалось, что при наиболее благоприятных кристаллографических ориентациях наблюдаемые дефекты объединяются, образуя зоны пластического течения длиной до 100 мкм (рис. 4, *б*), ориентированные в направлении действия ударника. Если данное предположение верно, то в этих зонах пластическое течение должно возникать в результате согласованного движения вихрей, подобного движению гидродинамических струй. Данное предположение косвенно подтверждает форма откольной щели, которая образуется при слиянии пор округлой конфигурации (см. рис. 3).

Исследование образцов, в которых произошел откол, показало, что форма откольной щели в них существенно отличается от форм, характерных для сталей с различными прочностью и фазовым составом, алюминиевых и никелевых сплавов [8, 14, 16]. В этих металлах откольная щель представляет собой либо совокупность продольных (в направлении распространения ударной волны) и поперечных мезотрещин, либо объединение извилистых мезодефектов, форма которых подобна форме регулярной поверхности Коха.

В рассматриваемом случае откольная щель (магистральная трещина, пересекающая весь образец) образуется за счет слияния пор различной формы (см. рис. 3), что приводит к структурному макромасштабному (на уровне множественных трещин откола) “хаосу”, обусловленному, по-видимому, неустойчивостью пластической деформации вследствие различия ее скоростей в смежных зонах пластического течения.

Полученные изображения рельефа на микрошлифах вблизи пластически “сопрягающихся” структурных элементов (рис. 5) свидетельствуют о локализации процесса деформирования, что в свою очередь указывает на наличие вихревого пластического течения,

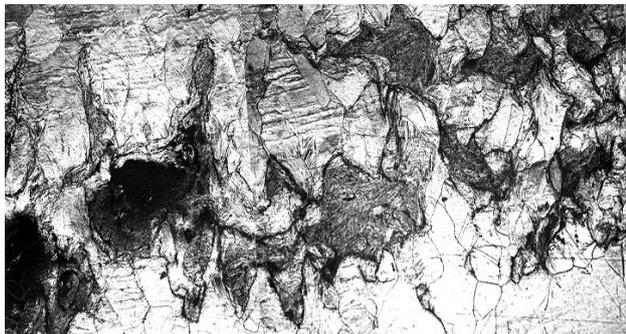


Рис. 5

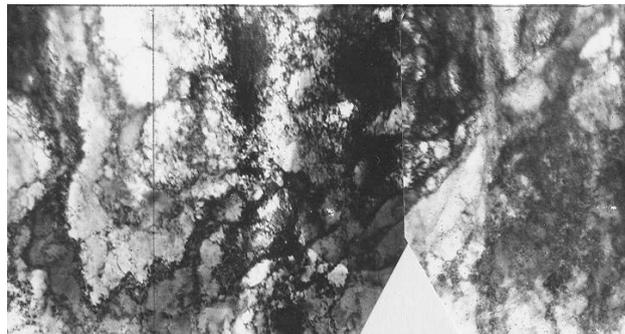


Рис. 6

Рис. 5. Микроструктура образца с откольной щелью, образовавшейся в нем после удара со скоростью $V_0 = 117$ м/с ($\times 50$)

Рис. 6. Дислокационная структура образца в зоне деформации после удара со скоростью $V_0 = 94$ м/с ($\times 16000$)

характеризующегося изменением профиля скоростей сдвига в пределах полосы деформации [17]. Следует отметить, что такие полосы пластического течения обнаруживаются только в тех мишенях, в которых скорость удара была достаточной для образования откольной щели. Аналогичный переход к вихревой пластической деформации наблюдается у меди марки МЗ в сходных условиях нагружения [13].

При нагружении с меньшими скоростями, когда протяженные откольные щели отсутствуют, на микрошлифах формируется рельеф, что свидетельствует о наличии в зернах гомогенной интенсивной и кристаллографически обусловленной деформации.

Методами просвечивающей электронной микроскопии в тонких фольгах, изготовленных из испытанных образцов, регистрировались дислокации, образующие равноосную мелкоячеистую структуру с неровными стенками (рис. 6). Плотность дислокаций в таких структурах составляла не менее 10^{15} м⁻². В некоторых областях наблюдались протяженные микрополосы локализованного сдвига шириной приблизительно 0,5 мкм.

В ряде случаев внутри зерен обнаружены цепочки пор (рис. 7), что в целом не противоречит предположению о гомогенном характере деформации в этих зернах, поскольку поры возникали вокруг частиц округлой формы, имеющих высокую прочность. На границах зерен обнаружено большое количество пор и микротрещин, что свидетельствует о непрочности этих границ.

При проведении детальных металлографических исследований образца (точнее, его откольной “тарелочки”), в процессе нагружения которого происходило плавное изменение интерференционного сигнала, установлено, что в исследуемой области образца (вблизи его тыльной поверхности) содержится большое количество почти идеально сферических микропор диаметром $2 \div 3$ и $5 \div 7$ мкм. Поры объединялись в цуги в виде лучей, направление которых совпадало с направлением распространения ударной волны. Расстояние между центрами пор составляло $2 \div 10$ мкм (рис. 8). Наличие этих пор можно объяснить влиянием поворотных механизмов деформации вблизи тыльной поверхности образца, что приводило к ухудшению ее качества (полированная поверхность становилась матовой).

Результаты определения параметров поврежденности показали, что с увеличением скорости ударника общее количество микро- и мезодефектов увеличивается. При этом наблюдаются следующие эффекты.

1. При небольших скоростях ударника (когда откольная щель отсутствует) количество продольных дефектов, расположенных вдоль направления движения волны сжатия,



Рис. 7

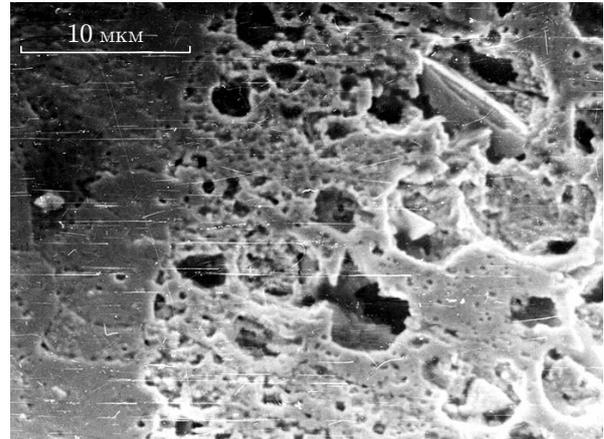


Рис. 8

Рис. 7. Цепочки пор в образце, образовавшиеся после удара со скоростью $V_0 = 184$ м/с

Рис. 8. Поры в откольной “тарелочке”

существенно превышает количество поперечных дефектов, расположенных параллельно свободной поверхности. Число дефектов круглой формы является промежуточным, однако количество и круглых, и продольных дефектов в несколько раз превышает количество поперечных дефектов.

2. При небольших скоростях удара дефекты с максимальной площадью, приближенно равной $50\,000$ мкм², единичны.

3. С увеличением скорости ударника количество поперечных дефектов приближается к количеству круглых, а отношение количества продольных дефектов к количеству поперечных дефектов уменьшается в два раза. При этом общее число крупных дефектов увеличивается более чем на порядок.

Распределения по размерам, представленные в виде функций $n/n_{\max} = f(S/S_{\max})$, имели следующие особенности:

— при малых скоростях распределение продольных дефектов удовлетворяло нормальному закону, дефектов круглой формы — бимодальному распределению, поперечных — пуассоновскому;

— при больших скоростях ударника распределение продольных дефектов становилось биномиальным, поперечных — экспоненциальным; распределение круглых дефектов оставалось бимодальным, однако характер их пиков и впадин, а также их расположение менялись произвольно; с увеличением скорости удара угол наклона кривой распределения увеличивался.

На рис. 9 приведены распределения относительных площадей дефектов при различных скоростях ударника.

Таким образом, в силу различных законов распределения при разных скоростях ударника автомодельность накопления повреждений отсутствует, что не позволяет получить аналитические зависимости вида $n = f(V_0)$.

При определении фрактальной размерности контура откольной щели по соотношению $D_f = \lg L / \lg N$ при $N = 12, 100, 1000$ и скоростях ударника $V_0 = 140, 177, 189, 261, 388$ м/с получены значения $D_f = 1,36; 1,32; 1,30; 1,26; 1,09$ соответственно. Приближенная аналитическая зависимость фрактальной размерности от скорости удара имеет следующий вид:

$$D_f = 1,5 - 0,001V_0. \quad (1)$$

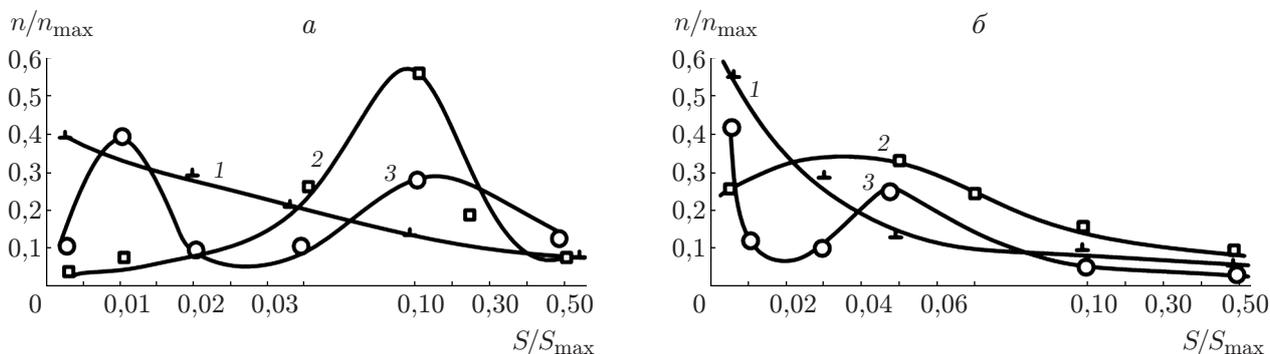


Рис. 9. Распределения дефектов по размерам:

a — $V_0 = 62$ м/с, b — $V_0 = 189$ м/с; 1 — поперечные дефекты, 2 — продольные дефекты, 3 — дефекты круглой формы

Анализ полученных результатов. Поскольку диссипация энергии разрушения на различных масштабных уровнях пропорциональна фрактальной размерности [18]:

$$W \sim kR^{3(D_f-1)}$$

(k — размерный коэффициент; R — структурный размер, соответствующий рассматриваемому масштабу), из уравнения (1) следует, что доля энергии, обусловленной наличием процессов диссипации на поверхностях откольной щели, уменьшается с увеличением скорости удара. Наибольшая рассеивающая способность имеет место в системах дефектов, возникших в условиях квазистатического деформирования ($V_0 \rightarrow 0$).

Фрактальная размерность кластера характеризует степень заполнения им соответствующего пространства. В рассматриваемом случае это означает степень увеличения длины контура откольной щели по сравнению с ее проекцией. Иными словами, чем меньше фрактальная размерность, тем меньше фактическая длина контура.

Заключение. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

При небольших скоростях ударника ($V_0 = 45 \div 65$ м/с) в меди реализуется внутривершинная гомогенная интенсивная и кристаллографически обусловленная пластическая деформация.

При $V_0 > 65$ м/с пластическая деформация локализуется в виде микрополос сдвига шириной до 20 мкм, что может быть обусловлено термодинамической потерей устойчивости в системе дефектов, имеющих кристаллическое строение, при этом возникает вихревое пластическое течение.

При режимах нагружения, приводящих к образованию в образцах откольных щелей ($V_0 \geq 140$ м/с), влияние вихревого пластического течения становится более существенным, что вызывает вращение (ротацию) крупных структурных элементов материала, которое прекращается при достижении предела его пластичности и локальном нарушении сплошности металла.

Автомодельность накопления повреждений в материале образцов отсутствует.

Форма контура откольной щели является фрактальной кривой, фрактальная размерность которой уменьшается по линейному закону в зависимости от скорости удара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барактин Б. К., Мещеряков Ю. И., Савенков Г. Г. Статистические характеристики множественного разрушения металлических мишеней при динамическом нагружении и их связь с механическими параметрами материалов // Журн. техн. физики. 2010. Т. 80, вып. 1. С. 79–84.

2. **Батьков Ю. В., Игнатова О. Н., Кондрохина И. Н. и др.** Особенности стадии зарождения поврежденности при интенсивном нагружении меди // Физика твердого тела. 2011. Т. 53, вып. 4. С. 716–720.
3. **Иванов А. Г.** О возможных причинах хрупких разрушений // ПМТФ. 1988. № 3. С. 137–141.
4. **Атрошенко С. А., Гладышев С. А., Мещеряков Ю. И.** Исследование механизмов смен масштаба структурных уровней разрушения динамически нагружаемых сред // Докл. 4-го Всесоюз. совещ. по детонации. Телави: Б. и., 1988. Т. 1. С. 286–292.
5. **Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов** / Под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1995. Т. 1.
6. **Мещеряков Ю. И., Диваков А. К.** Интерференционный метод регистрации скоростной неоднородности частиц в упругопластических волнах нагрузки в твердых телах. Л., 1989. (Препр. / Ленингр. филиал Ин-та проблем машиноведения; № 25).
7. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. М.; Ижевск: Ижев. ин-т компьютер. исслед.: Науч.-издат. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2010.
8. **Савенков Г. Г.** Фрактально-кластерная модель откольного разрушения // Журн. техн. физики. 2002. Т. 72, вып. 12. С. 44–48.
9. **Барахтин Б. К., Савенков Г. Г.** Связь характеристик откола с размерностью фрактальной структуры разрушения // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 6. С. 61–69.
10. **Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Новиков С. А., Рузанов А. И.** Численное моделирование откольного разрушения металлов // Фракталы в прикладной физике. Арзамас-16: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1995. С. 59–123.
11. **Канель Г. И., Сугак С. Г., Фортов В. Е.** О моделях откольного разрушения // Пробл. прочности. 1983. № 8. С. 40–44.
12. **Савенков Г. Г., Васильев Н. Н.** Пластичность и прочность меди при высокоскоростной деформации // Пробл. прочности. 1993. № 10. С. 47–52.
13. **Мещеряков Ю. И., Жигачева Н. И., Диваков А. К. и др.** Переход металлов в структурно-неустойчивое состояние при ударно-волновом нагружении // ПМТФ. 2010. Т. 51, № 5. С. 132–146.
14. **Барахтин Б. К., Мещеряков Ю. И., Савенков Г. Г.** Динамические и фрактальные свойства стали СП-28 в условиях высокоскоростного нагружения // Журн. техн. физики. 1998. Т. 68, вып. 10. С. 43–52.
15. **Разрушение** разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2001.
16. **Савенков Г. Г.** Механизмы деформации и разрушения пластичных и твердых тел при высокоскоростном взаимодействии: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2003.
17. **Ханнанов Ш. Х.** Структурная турбулентность в аморфных и кристаллических телах // Дисклинация и ротационная деформация твердых тел / Под ред. А. Е. Романова. Л.: Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе, 1990. С. 215–224.
18. **Carpinteri A., Pugno N., Puzzi S.** Strength vs. toughness optimization of microstructured composites // Chaos, Solitons Fractals. 2009. V. 39. P. 1210–1223.

*Поступила в редакцию 25/VII 2012 г.,
в окончательном варианте — 17/X 2013 г.*