

С. А. Атрошенко, О. Я. Бейлина, С. А. Гладышев,  
А. К. Диваков, Ю. И. Мещеряков, Ю. А. Петров

## О ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОТКОЛЕ

Тыльный откол, возникающий при высокоскоростном соударении пластин,— сложный процесс. Его реализации на макроуровне предшествуют многие процессы на микроуровне, такие как зарождение и рост микропор и трещин, слияние их в магистральные трещины и т. д. Между тем единственные характеристики откольного процесса, которые можно получить непосредственно из опытов по соударению пластин,— длительность импульса нагружения и величина нормального напряжения, развиваемого в зоне откола. Как отмечалось в ряде работ, последняя характеристика имеет очень большой разброс — даже для одного и того же материала, нагружаемого с различной скоростью (но при постоянной длительности импульса нагружения), опытные данные могут отличаться почти на порядок.

Как показывают исследования [1, 2], формирование откольной поверхности включает не только образование нормальных разрывов, параллельных фронту волны, но также сдвиговые процессы, которые не учитываются величиной откольного напряжения. Металлографические исследования откольной зоны показывают, что откольная щель часто имеет явно выраженную ступенчатую форму, включающую участки, параллельные и перпендикулярные фронту волны.

Типичный пример такой щели показан на рис. 1, а. Видно, что в откольной щели имеются не только участки нормального разрыва, но и продольного локализованного сдвига, осуществляемого, как правило, по краям нормальных разрывов. Некоторые продольные участки имеют характерные признаки так называемых «адиабатических полос сдвига» — узкие (порядка 1 мкм) полосы, направленные вдоль вектора скорости частиц и имеющие после травления белый цвет. Обращает на себя внимание также многомасштабный характер ступенчатого строения откольной щели, т. е. значительный разброс размеров продольных и поперечных участков. В других случаях реализуется более сложная конфигурация откольной щели, состоящей из отрезков, ориентированных под углом  $\alpha = 45^\circ$  по отношению к направлению распространения волны, так что не всегда ясно, являются ли они результатом нормального разрыва материала или же носят сдвиговый характер. Примером может служить показанная на рис. 1, б откольная трещина, полученная при скорости нагружения 400 м/с.

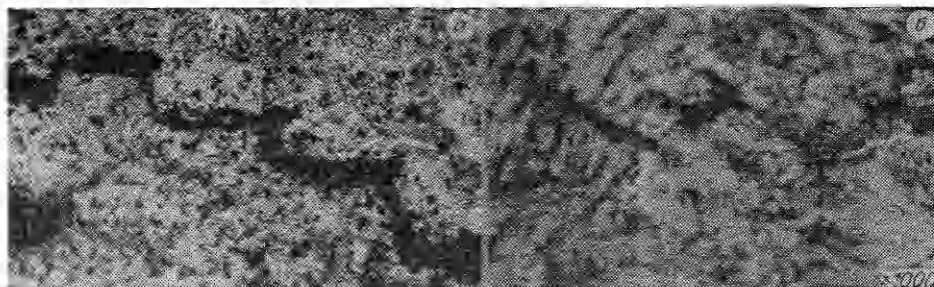


Рис. 1. Откольная щель ступенчатой формы (а,  $\times 312,5$ ) и зигзагообразной (б,  $\times 1000$ ) в стали 30X2H2MFA.

© 1990 Атрошенко С. А., Бейлина О. Я., Гладышев С. А., Диваков А. К., Мещеряков Ю. И., Петров Ю. А.

Для выяснения закономерностей формирования откольной поверхности и роли локализованных сдвигов в этом процессе в настоящей работе проведены экспериментальные исследования механизмов зарождения, развития и локализации динамического разрушения при тыльном отколе. С этой целью выполнены детальные металлографические анализы различных стадий откола при разной скорости соударения и проведена статистическая обработка размеров структурных элементов откольных щелей, а также их ориентации по отношению к направлению распространения волны.

Ударное нагружение образцов в диапазоне скоростей 250—500 м/с осуществляли на пневматической пушке калибра 30 мм. Образцы имели форму плоских шайб диаметром 52 и толщиной 3 мм. Толщина пластины-ударника во всех опытах была примерно одинаковой и равной 1,2 мм. В качестве материала мишени взяты три партии образцов из сталей 30Х2Н2МФА, 35ХН2МФА и 45ХНМФА, каждая из которых прошла термообработку на разную величину аустенитного зерна.

Исследования показали, что процессы локализации деформации при отколе находятся в тесной взаимосвязи с характером распределения частиц по скоростям в волне нагрузки и имеют несколько стадий в зависимости от скорости нагружения  $u$  (под скоростью нагружения здесь и далее принимается скорость полета пластины-ударника). Условно процессы локализации при отколе можно разделить на категории:

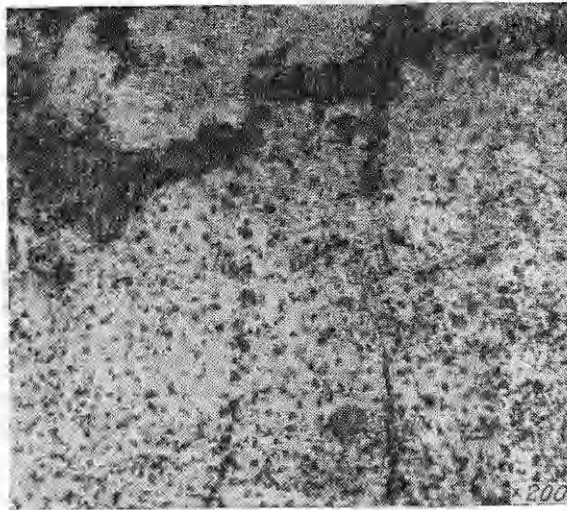
- 1) локализация деформации и разрушения в форме нормальных разрывов, ориентированных параллельно фронту волны;
- 2) локализация деформации в форме микросдвигов и трещин, перпендикулярных фронту волны или направленных под углом  $\alpha = 45^\circ$  к нему.

Первая категория микроразрушений есть следствие взаимодействия прямой и обратной волн разгрузки. При малых  $u$  это взаимодействие приводит только к образованию микропор. С увеличением  $u$  начинают появляться микроразрывы, параллельные свободной поверхности мишени. Из металлографических исследований вытекает, что все нормальные микроразрывы, как правило, развиваются из микропор, дающих начало распространению микротрещин при напряжениях, достигающих некоторой критической величины. При увеличении  $u$  разрозненные микроразрывы объединяются в трещины микроскопической величины, также параллельные свободной поверхности и расположенные на разных расстояниях от нее, образуя зону откола.

Вторая категория микроразрушений связана с процессами сдвиговой локализации деформации и является прямым следствием неоднородного характера процесса динамического деформирования. Наличие продольных микросдвигов и микротрещин свидетельствует о том, что движутся элементы среды при динамическом деформировании в виде микропотоков, имеющих некоторый разброс по скоростям относительно друг друга. В результате на границах соседних микропотоков имеют место микросдвиги, ориентированные вдоль направления распространения волны. Эти микросдвиги отчетливо наблюдаются при металлографических исследованиях поперечных шлифов образцов, подвергнутых ударному нагружению. В то же время их следы отсутствуют на исходных образцах.

Следует различать локализованные сдвиги, образующиеся при прямом прохождении переднего фронта импульса, и полосы адиабатического сдвига — при взаимодействии встречных волн разгрузки. Первые имеют внешние признаки полос повышенной травимости и на поперечных шлифах они выглядят в виде узких ( $\sim 1$  мкм) темных полос длиной 10—40 мкм. Они равномерно распределены по всему поперечному сечению образца в зоне откола и вне ее. Второй тип продольной сдвиговой локализации осуществляется в условиях высокой скорости деформации при взаимодействии встречных волн разгрузки. Они встречаются только

Рис. 2. Откольная трещина ( $\times 200$ ), в которой длина нормальных микроразрывов определяется расстоянием между продольными микросдвигами, направленными вдоль распространения волны.



в зоне откола, соединяя нормальные разрывы, также полученные при взаимодействии встречных волн разгрузки.

При больших скоростях нагружения развитие обоих процессов локализации идет взаимосвязано. В частности, как видно из рис. 2, длина поперечных участков откольной щели (нормальных микроразрывов) определяется расстоянием между продольными микросдвигами, образовавшимися при прохождении переднего фронта импульса сжатия.

Для определения пространственных масштабов продольной и поперечной локализации разрушения при отколе в настоящей работе проведена статистическая обработка геометрических размеров микроразрушений в зоне откола. Детально обмерены все продольные и поперечные микроразрушения в образцах, нагружаемых с различной скоростью. Результаты обработки выявили вполне отчетливую группировку микротрещин на четыре масштабных уровня — два для продольных сдвигов и два для нормальных разрывов. На рис. 3 представлены нормализованные кривые распределения продольных  $h, H$  и поперечных  $d, D$  микроразрушений. Данные статистической обработки микроразрушений в образцах одной партии исследуемой стали при различной скорости нагружения представлены в таблице, где указаны средние размеры, соответствующие максимумам распределения микроразрушений по размерам. Из кривых распределения и данных таблицы следует, что масштабные уровни разрушения как для продольного сдвига, так и для нормального разрыва различаются примерно на 1—1,5 порядка внутри каждого типа локализации; по мере увеличения скорости нагружения реализуются все более крупномасштабные уровни локализации разрушения.

Если пороговое напряжение  $\sigma_n$  образования нормального микроразрыва меньше такового для продольного сдвига  $\sigma_{пр}$ , то в зоне откола присутствуют только нормальные разрывы, расположенные, как правило, на различных расстояниях от свободной поверхности и образующие зо-

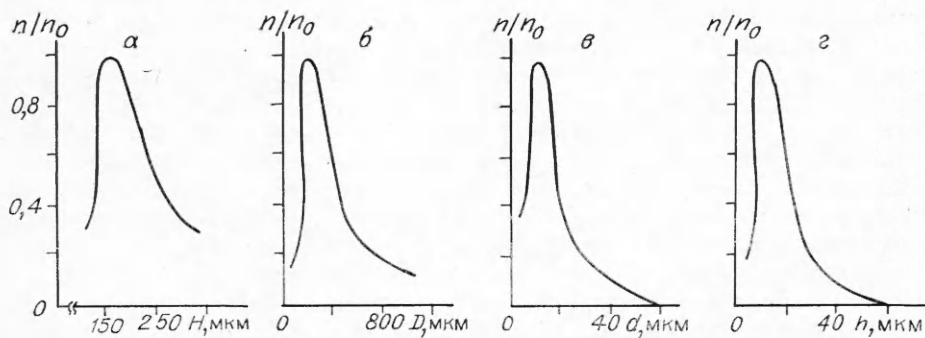


Рис. 3. Нормализованные кривые продольных и поперечных микроразрушений в стали 30X2H2MФА при  $u = 400$  м/с.

$v$ , м/с	Характеристика микроразрушений, мкм				$\Delta v$ , м/с
	$d$	$h$	$D$	$H$	
300	11	10			117
340	25	12	190		155
400	11	9	180	165	20

ну откола. Такая картина, например, наблюдается в стали 45ХНМФА при  $u = 250 \div 270$  м/с. С ростом скорости нагружения до 290—300 м/с в этом материале появляются продольные микродвиги при прохождении переднего фронта импульса сжатия, а затем как результат взаимодействия встречных волн разгрузки образуются нормальные разрывы. При этом размеры последних в данном случае определяются расстоянием между продольными микродвигами, как это и показано на рис. 2.

Если  $\sigma_{пр} < \sigma_n$ , может реализоваться ситуация, когда на поперечном микрошлифе наблюдаются только продольные сдвиги. Такая ситуация отмечается в образцах, вырезанных из прутка сплава Д-16 так, что плоскость мишени перпендикулярна оси прутка. В этом случае вследствие явно выраженной продольной текстуры исходного образца порог продольной локализации существенно (на  $\sim 30\%$ ) ниже порога нормального разрыва [1, 2].

При дальнейшем увеличении  $u$  нормальные микроразрывы за время действия импульса растяжения в зоне откола успевают объединиться в макроразрывы  $D$ . Наконец, при еще большем значении  $u$  макроразрывы размера  $D$  соединяются с макродвиговыми трещинами размера  $H$ . Если скорость нагружения заведомо больше пороговой, то две последние стадии идут одновременно, что означает окончательное формирование откольной поверхности. При этом две первые стадии могут отсутствовать вообще, т. е. откольное разрушение осуществляется только на крупных масштабных уровнях.

Если поперечные размеры нормальных микроразрывов  $d$ , как правило, определяются расстояниями между микродвигами, появившимися вследствие сдвиговой релаксации материала на переднем фронте импульса сжатия, то размеры  $D$  зависят от расстояния, которое успевают пройти поперечная трещина за время действия растягивающей фазы напряжения в зоне откола. При длительности импульса  $\sim 0,35$  мкс, одинаковой во всех описываемых опытах, и среднем  $D = 180$  мкм скорость поперечной трещины оказывается равной  $\sim 500$  м/с. Поскольку растягивающая фаза импульса напряжения короче фазы сжатия, то скорость трещины находится в пределах 500—1000 м/с. Эти оценки совпадают с прямыми измерениями скорости трещины при динамическом нагружении, проведенными в [3].

Как показали дальнейшие исследования, описанная выше картина формирования откольной зоны, при которой откольная щель состоит из продольных локализованных разрушений сдвигового типа и поперечных микроразрывов, реализуется не для всех материалов, а только для обладающих очень широким распределением частиц по скоростям. Используемая для регистрации интерферометрическая методика измерения скорости свободной поверхности ударно-нагружаемых мишеней позволяет также определять ширину распределения частиц по скоростям. Эта характеристика, как оказалось, имеет немонотонный вид в зависимости от скорости нагружения для каждого конкретного материала. Кроме того, величина максимума различна для разных материалов. Установлено, что если разброс частиц по скоростям в процессе ударно-волнового нагружения соизмерим со средней скоростью частиц (т. е.  $\Delta v \approx \bar{v}$ ), то откольная щель имеет ступенчатый вид (см. рис. 1, а). Если для материала свойственно узкое, близкое к  $\delta$ -образному, распределение по ско-

ростам ( $\Delta v \leq 0,1\bar{v}$ ), то откольная щель имеет сдвиговый характер (см. рис. 1, б).

Поскольку уменьшение ширины распределения частиц по скоростям в сущности означает, что динамическое деформирование материала становится более однородным и изотропным, естественно ожидать, что оно будет осуществляться по плоскостям максимального касательного напряжения, которые в изотропном теле ориентированы под углом  $45^\circ$ . Именно такая ситуация наблюдается в материалах с узким распределением частиц по скоростям. Если же материал допускает очень широкий разброс по скоростям, то соседние микрообъемы, имея большие относительные скорости, могут инерционно проскальзывать относительно друг друга. Результатом такого проскальзывания и являются полосы локализованной сдвиговой деформации, ориентированные преимущественно вдоль направления распространения волны, независимо от кристаллографической ориентации отдельных зерен. Более того, поскольку даже для одного и того же материала ширина распределения микропотоков материала по скоростям в зависимости от скорости нагружения изменяется немонокотно, следует ожидать, что с ростом  $u$  должен изменяться и характер разрушения. Так как с увеличением  $u$  функция распределения по скоростям становится более узкой, то должна увеличиться доля микросдвигов, ориентированных по плоскостям максимального касательного напряжения, т. е. под углом  $45^\circ$  к направлению распространения волны.

Для проверки этого предположения в настоящей работе выполнена статистическая обработка картины микроразрушений в зоне откола и построены кривые распределения микроразрушений по их ориентациям по отношению к направлению распространения волны. Результаты статистического анализа представлены на рис. 4. При малой скорости нагружения материал в зоне откола разрушается главным образом за счет микроразрывов, параллельных фронту волны. На поперечных шлифах мишеней эти микроразрывы выглядят в виде разрозненных поперечных трещин или спаренных пор размером 10—30 мкм. При  $u \leq 340$  м/с начинают появляться локализованные сдвиги, ориентированные под углом  $45^\circ$ . Наконец, при  $u = 400$  м/с значительная часть микроразрушений осуществляется в виде локализованных сдвигов, ориентированных либо в направлении распространения волны, либо под углом  $45^\circ$  к нему. В этом случае осуществляется соединение нормальных макроразрывов размера  $D$  (в обозначениях рис. 3) продольными макросдвигами размера  $H$ . Этим объясняется возрастание числа продольных сдвигов на нижней кривой распределения на рис. 4. Процесс формирования макроразрывов размера  $D$  закончился еще при  $u = 340$  м/с, вследствие чего их число не изменилось при возрастании скорости от 340 до 400 м/с. В то же время резко увеличилось число сдвигов с  $\alpha = 45^\circ$ , что свидетельствует об уменьшении ширины распределения частиц по скоростям и более однородном характере деформирования материала.

Приведенные выше результаты статистических исследований сопоставим с макроскопическими характеристиками динамической прочности, в частности с откольной прочностью материала и с еще одной статистической характеристикой материала — шириной распределения частиц по скоростям по методике [4, 5]. Как показано в [4], ширина распределения связана с числом биений интерференционного сигнала соотношением

$$\Delta v = \lambda_0 / \tau_s \cdot \Delta N,$$

где  $\Delta N$  — недостающее число биений на интерферограмме по сравнению с тем, которое было бы при отсутствии распределения частиц по скоростям;  $\tau_s$  — время задержки дифференциального интерферометра. Уменьшение числа биений на переднем фронте импульса сжатия можно трактовать как реальное снижение средней скорости частиц вследствие сдвиговой релаксации материала путем зарождения локализованных сдвигов.

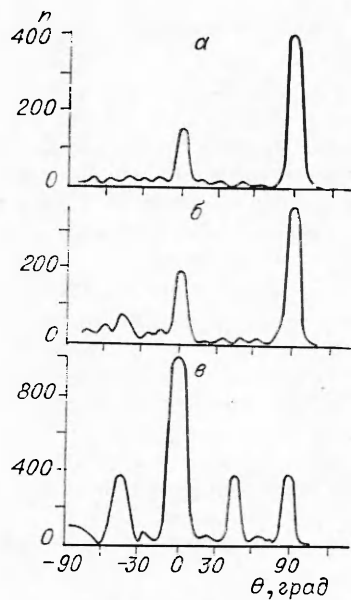


Рис. 4. Кривые распределения микроуражений по ориентациям по отношению к направлению распространения волны в стали 30X2H2MFA при  $u = 300$  (а), 340 (б) и 400 м/с (в).

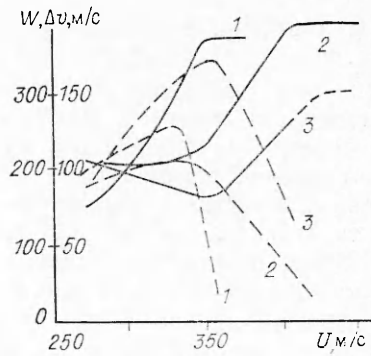


Рис. 5. Зависимость откольной скорости  $W$  (сплошные линии) и ширины распределения частиц по скоростям  $\Delta v$  (штриховые) от скорости нагружения для сталей 45XHMFA (1), 35XH2MFA (2), 30X2H2MFA (3).

Как показали испытания материалов, максимального значения откольной прочности материал достигает при минимальном  $\Delta v$ . И наоборот, при таких значениях  $u$ , которым соответствует максимум ширины распределения по скоростям, откольная прочность принимает наименьшее значение (рис. 5); зависимости  $W(\Delta v)$  представлены на рис. 6. Видно, что при отсутствии распределения частиц по скоростям (и соответственно при отсутствии сдвиговой релаксации материала) материал обладает наибольшей динамической прочностью на откол. Одним из возможных механизмов уменьшения откольной прочности с ростом  $\Delta v$  может быть рост вероятности зарождения одновременно очень большого числа трещин на боковых поверхностях микропотоков, поскольку при движении относительно друг друга они выступают как самостоятельные объемы. В этом случае увеличивается доля поверхностных источников микротрещин по сравнению с объемной. При этом откольная поверхность может формироваться как совокупность разрывов индивидуальных микропотоков, как это описано в работе [1].

Если в вязких материалах релаксация динамических напряжений при ударно-волновом нагружении осуществляется путем продольных микросдвигов, как видно в случае сталей 30XH4M, 30X2H2MFA и 45XHMFA, то в хрупких материалах диссипация энергии на плато импульса сжатия происходит вследствие образования густой сети микротрещин, а также фрагментации структуры материала. Такая картина, например, наблюдается в керамике [6], в результате чего, как описы-

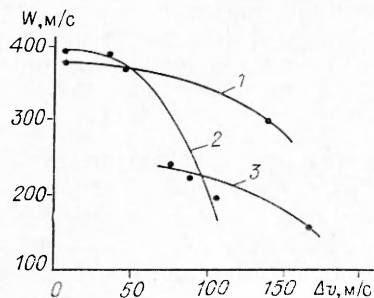


Рис. 6. Зависимость откольной скорости от ширины распределения частиц по скоростям (обозначения аналогичны рис. 5).

вают авторы, происходит значительная «присадка» амплитуды импульса сжатия и уменьшается упругая часть заднего фронта импульса.

На основании изложенного можно заключить, что процессы локализации деформирования и разрушения материала при отколе протекают следующим образом. При малых  $u$ , близких к пороговым напряжениям продольного сдвига, на переднем фронте импульса и на его плато имеет место сдвиговая релаксация материала вследствие возникновения продольных микросдвигов. Примерно при этих же скоростях нагружения образуются нормальные микроразрывы из-за взаимодействия прямой и обратной волн разгрузки в зоне откола. Эти два типа локализации деформации и разрушения составляют низший масштабный уровень локализации. При увеличении  $u$  реализуется второй масштабный уровень откольного процесса — образование нормальных макроразрывов и продольных макросдвигов. Размеры нормальных макроразрывов определяются длительностью растягивающей фазы импульса нагружения и скоростью поперечных трещин, развивающихся из нормальных микроразрывов или пор. Продольные макросдвиги также возникают в результате взаимодействия встречных волн разгрузки. Они локализованы в зоне откола и соединяют нормальные макроразрывы. Скорость деформации при образовании в сталях продольных макросдвигов может быть достаточной для того, чтобы последние реализовались в виде полос адиабатического сдвига. При больших значениях  $u$  первого масштабного уровня откольного разрушения — образования продольных микросдвигов и нормальных микроразрывов — может не быть вообще. Причем продольные микросдвиги не возникают из-за очень узкого распределения микропотоков материалов по скоростям, а нормальные микроразрывы сразу реализуются в виде макроразрывов. В итоге откольная щель приобретает ступенчатую или сдвиговую форму с одним масштабным уровнем составных элементов щели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мещеряков Ю. И. Поверхность. Физика, химия, механика, 1988, 3, 101.
2. Мещеряков Ю. И. ЖТФ, 1988, 58, 3, 628.
3. Златин Н. А., Пугачев Г. С., Воловец Л. Д. и др. ЖТФ, 1981, 51, 7, 1506.
4. Диваков А. К., Коханчик Л. С., Мещеряков Ю. И. и др. ПМТФ, 1987, 3, 135.
5. Мещеряков Ю. И., Диваков А. К., Кудряшов В. Г. ФГВ, 1988, 24, 2, 126.
6. Rosenberg Z., Yeshurun Y., Brandon D. G. J. de Physique, 1985, 46. С. 5—331.

г. Ленинград

Поступила в редакцию 26/1 1989

УДК 532.23

*Е. Е. Мешков, В. В. Никифоров, А. И. Толшмяков*

#### О СТРУКТУРЕ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ГРАНИЦЕ ДВУХ ГАЗОВ, УСКОРЯЕМОЙ УВ

Эксперименты по исследованию структуры зоны турбулентного перемешивания на границе двух газов разной плотности, ускоряемой серией стационарных ударных УВ, проводились на ударной трубе (УТ) в постановке, аналогичной описанной в [1, 2]. Конец канала УТ сечением  $120 \times 40$  мм с прозрачными боковыми стенками состоял из стыкуемых блоков, разделенных тонкой органической пленкой с удельной массой  $(3-4) \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>2</sup>. Плоскости стыков блоков были перпендикулярны оси УТ. Во внутренних объемах блоков последовательно располагались воздух, воздух с подмешанным к нему табачным дымом и гелий. Конец