

## Локализация пластического сдвига при ударном нагружении

В. А. Федорчук

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты экспериментальных исследований локализации сдвига в КЭП-образцах при ударном нагружении. По данным металлографических исследований материала в области пластического течения получено характерное распределение величины деформации поперек полосы сдвига.

**Ключевые слова:** локализация, сдвиг, удар, полоса адиабатического сдвига.

При интенсивном динамическом нагружении элементов конструкций, а также в ряде случаев высокоскоростной механической обработки металлов вследствие кратковременности протекающих процессов, геометрических и других факторов имеет место неоднородность напряженно-деформированного состояния. С увеличением скорости нагружения преобладающим механизмом деформирования становится локализация деформаций с формированием в материале полос адиабатического сдвига (ПАС) и деформационных полос (без заметных превращений в материале полосы).

Для исследования адиабатического сдвига в металлах при ударном нагружении использовали образцы в виде диска, так называемые КЭП-образцы (рис. 1, а). При нагружении такого образца пластическая деформация сдвига, как правило, локализуется в узкой полосе материала вдоль линии, соединяющей угловые точки. Если диаметр  $D_2 \cong D_1$ , то на цилиндрической поверхности сдвига возникает повышенное радиальное давление, которое подавляет возможное развитие трещины отрыва, распространяющейся от концентраторов (угловых точек), и влияет на развитие локализации деформаций. Изменение конструктивных параметров КЭП-образца позволяет варьировать величину абсолютного сдвига в рабочем сечении и ширину области интенсивного сдвига.

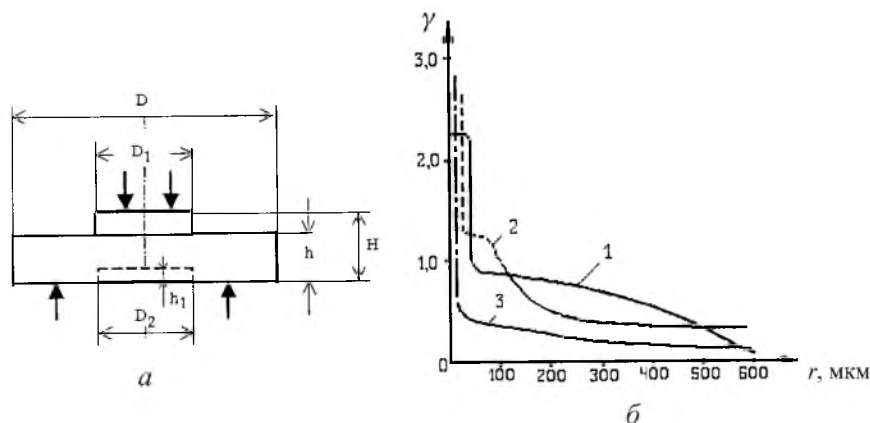


Рис. 1. КЭП-образец для испытаний на сдвиг (а) и распределение деформации в области полосы сдвига (б): 1, 2 – сталь,  $V = 5$  и  $66$  м/с соответственно; 3 – титановый сплав,  $V = 5$  м/с.

В работах [1, 2] для изучения контролируемого зарождения полосы адиабатического сдвига в материале проводили испытания КЭП-образцов с использованием метода разрезного стержня Гопкинсона на сжатие. Ввиду неоднородности деформации в зоне сдвига в радиальном направлении в КЭП-образце определение зависимости напряжения  $\tau$  – деформация  $\gamma$  затруднено и требует применения численных расчетов, например, методом конечных элементов.

В данной работе исследование особенностей деформирования и повреждения металлов в процессе локализованного сдвига при адиабатических условиях деформирования ограничено изучением микроструктурных изменений в КЭП-образцах.

Объектом испытаний на сдвиг служили образцы из высокопрочной стали (40HRC,  $\sigma_T = 1076$  МПа,  $\sigma_B = 1155$  МПа,  $\delta = 0,32$ ,  $\psi = 0,56$ ) и титанового сплава (42HRC,  $\sigma_T = 893$  МПа,  $\sigma_B = 957$  МПа,  $\delta = 0,19$ ,  $\psi = 0,24$ ), которые изготавливали из листового проката толщиной 13-14 мм в состоянии поставки (без какой-либо термообработки) чистовым точением. Размеры образцов представлены в таблице.

Геометрические размеры КЭП-образцов

Материал	$D$ , мм	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$H$ , мм	$h$ , мм	$h_1$ , мм
Сталь	52	20	20	13	11,5	1,5
Титановый сплав	52	20	20	14	12,5	1,5

Механические характеристики материалов получены при статических испытаниях на растяжение цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 4,0 мм.

Испытуемые образцы нагружали со скоростью 5 м/с ударом свободно падающей массивной бабы на вертикальном копре и со скоростью более 60 м/с ударом цилиндрического ударника диаметром и длиной 30 мм, разгоняемого по каналу ствола пневматической установки. В результате такого нагружения центральная часть образца смещалась относительно краевых участков. Абсолютный сдвиг в его рабочем сечении определялся величиной этого смещения и особенностями процесса деформирования. При отработке методики эксперимента были апробированы и другие схемы нагружения, в том числе схема обратного метания. Однако при ударе центральной части образца, предварительно разогнанного до заданной скорости, о массивную наковальню наблюдалось неравномерное перемещение краевых участков и его изгиб. Следовательно, такая схема нагружения неприменима для данных испытаний на сдвиг.

После нагружения образцы разрезали на две симметричные части (малая подача и охлаждение исключали сильный разогрев металла). По стандартной методике изготавливали шлифы для исследования микроструктуры в области локализованного сдвига с помощью оптической металлографии. Наиболее характерные снимки шлифов представлены в работе [3].

Проведенные исследования позволили установить характер распределения деформации сдвига  $\gamma$  и особенности повреждения материала в области локализованного течения. Величину деформации сдвига  $\gamma$  оценивали по углу наклона искривленных в процессе деформирования линий текстуры (или полос химической неоднородности) в материале, наблюдаемых на поверхности шлифов после травления. Полученные данные о распределении деформации  $\gamma(r)$  поперек полосы сдвига ( $r$  – расстояние от оси полосы локализации сдвига) для стали и титанового сплава при разной скорости нагружения приведены на рис. 1,б.

Из анализа полученных экспериментальных результатов следует, что максимальная локализация сдвига имеет место при образовании полосы адиабатического сдвига шириной  $\sim 10$  мкм в образцах из титанового сплава при  $V = 5$  м/с. Монотонный характер зависимости  $\gamma(r)$  в области, граничащей с ПАС (на рис. 1,б кривая 3), свидетельствует о том, что деформация сдвига локализована в узкой полосе, и соседние слои материала практически не участвуют в процессе деформирования. При такой же скорости ударного нагружения в стальном образце фазовых превращений материала в области локализованного сдвига не обнаружено. В этом случае в области интенсивного пластического течения сформировалась полоса сильно деформированной структуры толщиной  $\sim 40$  мкм, максимальная величина деформации сдвига в которой достигала 2,3...2,5. За пределами полосы деформация сдвига монотонно убывает от 0,9 (у границы полосы) до 0,1 (на удалении 0,6 мм от оси полосы) – на рис. 1,б кривая 1.

При ударном нагружении стальных образцов со скоростью  $V = 66$  м/с в материале образовалась ПАС шириной  $\sim 20$  мкм, а на зависимости  $\gamma(r)$  можно выделить два участка (на рис. 1,б кривая 2). Первый – граничащая с ПАС полоса материала шириной примерно 200 мкм, в пределах которой деформация резко возрастает с уменьшением  $r$ . Для второго участка ( $r > 250$  мкм) наблюдается однородное распределение деформации сдвига ( $\gamma = 0,3...0,4$ ).

Полученные экспериментальные зависимости  $\gamma(r)$  качественно соответствуют графикам распределения деформации в полосе сдвига, полученным по результатам численного моделирования кинетики процесса локализации сдвига в одномерной постановке [4], а также данным других исследований [5].

Анализ изменений микроструктуры и повреждений в поперечном сечении образца показал, что интенсивное деформирование материала в областях концентрации (у угловых точек) на начальной стадии нагружения приводит к образованию трещин. В деформированном материале на некотором удалении от концентраторов отмечаются повреждения в виде пор округлой формы. Далее следует область, где влияние концентраторов практически не сказывается и наблюдается формирование полосы локализации сдвига (ПАС – на рис. 2) или деформационной полосы.

Полученные результаты подтверждают вывод об определяющем влиянии на кинетику процесса локализации сдвига в материале повышения температуры в области пластического течения.

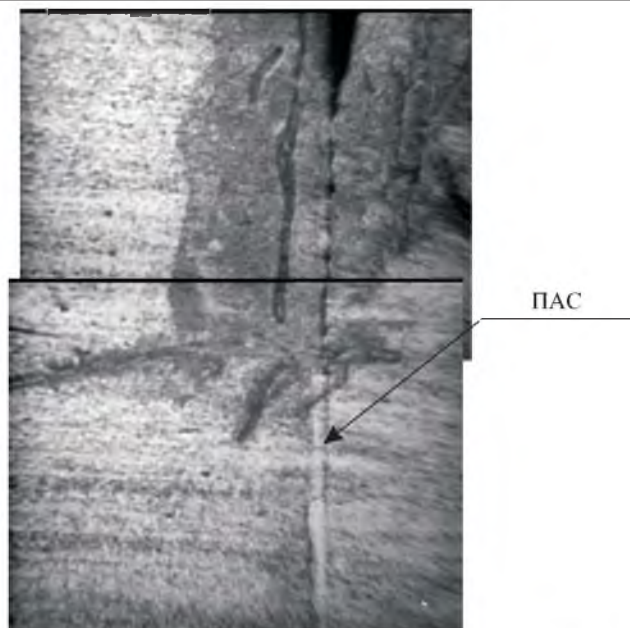


Рис. 2. Характерные повреждения и структура материала в области сдвига (образец из титанового сплава,  $V = 5$  м/с,  $\times 120$ ).

## Резюме

Наведено результати експериментальних досліджень локалізації зсуву в КЕП-зразках при ударному навантаженні. За даними металографічних досліджень матеріалу в області пластичної течії одержано характерний розподіл деформації поперек смуги зсуву.

1. *Hartman K. H., Kuntze H. D., and Meyer L. W.* High strain rate deformation of steel / М. А. Meyers and L. E. Murr (Eds.) // *Shock Waves and High-Strain Rates Phenomena in Metals*. – New York: Plenum Press, 1981. – P. 325.
2. *Beatty J. H., Meyer L. W., Meyers M. A., and Nasser S.* Formation of controlled adiabatic shear bands in AISI 4340 high strength steel // *Shock Waves and High-Strain Rates Phenomena in Metals*. – New York: Plenum Press, 1992. – P. 645 – 656.
3. *Степанов Г. В., Федорчук В. А.* Локализованный сдвиг в металлах при ударном нагружении // *Пробл. прочности*. – 2000. – № 2. – С. 27 – 42.
4. *Степанов Г. В., Федорчук В. А.* Локализованный сдвиг в тонколистовом материале // *Там же*. – 1999. – № 5. – С. 53 – 63.
5. *Rogers H. C. and Shastry C. V.* Material factors in adiabatic shear bands in steels / М. А. Meyers and L. E. Murr (Eds.) // *Shock Waves and High-Strain Rates Phenomena in Metals*. – New York: Plenum Press, 1981. – P. 285.

Поступила 06. 07. 2001