

03; 05

© 1991 г.

## МИКРОСТРУКТУРА МАТЕРИАЛОВ И МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ ПЛОСКИХ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

*Б. К. Барзтин, Ю. И. Мецераков, Г. Г. Савенков*

Представлены результаты микроструктурных исследований материала преград после внедрения в них плоских кумулятивных струй с начальными скоростями соударения 2.5—3.5 км/с. Показано, что в процессе проникания струи пластическая деформация носит турбулентный характер, осуществляясь в виде совокупности микропотоков вещества, движущихся с различными скоростями относительно друг друга. Предложена математическая модель процесса внедрения кумулятивной струи, учитывающая распределение микропотоков по скоростям и его влияние на глубину проникновения струи в преграду.

Разработка адекватных моделей, описывающих высокоскоростное проникание различных ударников в преграды для более глубокого понимания макроскопического взаимодействия соударяющихся тел, требует изучения этих процессов на микроскопическом уровне. Так, исследование структурных изменений в материалах преград, произошедших под воздействием кумулятивных струй с начальными скоростями соударения 4 . . . 8 км/с, позволило произвести оценки энергетических потерь при кратерообразовании [1]. Там же приведены данные о возможных каналах диссипации энергии деформирования, в частности, за счет поворотов (ротаций) микрообъемов материала, возникающих в волне нагрузки при больших давлениях. Изучение микроструктурных аспектов высокоскоростного проникания в преграды жестких ударников показало [2, 3], что соударение сопровождается сменой механизмов деформирования от пластического течения материала в условиях трехосного неравномерного напряженного состояния до образования адиабатических полос сдвига.

Использование экспериментальных данных, полученных разными структурно-чувствительными методами исследования, такими как оптическая и электронная микроскопия, лазерная интерферометрия и др., в ряде случаев дает возможность описать наблюдаемые явления с точки зрения масштабной иерархии структурных уровней высокоскоростной деформации [4, 5]. В то же время данных о поведении материалов при внедрении в них плоских кумулятивных струй, которые формируются при схлопывании оболочек удлиненных кумулятивных зарядов [6] и имеют скорости 2.5 . . . 3.5 км/с, в настоящее время накоплено недостаточно.

В работе приводятся результаты структурных исследований преград из технически чистых металлов и сталей различной прочности после воздействия на них плоской кумулятивной струи со скоростью соударения около 3 км/с и предлагается модель для описания проникания высокоскоростных струй и ударников.

Изучалась структура технически чистого алюминия, сплавов на его основе (АМг6, Д16), сталей разной прочности и титанового сплава ВТ6С. Исследования проводились методами локального рентгеноструктурного анализа с использованием микропучка диаметром 150 мкм, а также оптической и растровой электронной микроскопии.

Рентгенограммы, зарегистрированные от объемов металла преграды, расположенных на расстоянии не более 1 мм от поверхности разрушения, на различных глубинах проникания плоской струи в образцы из высокопрочных сталей (65Г с  $\sigma_v=2$  ГПа и 40Х с  $\sigma_v=700$  МПа), заметных структурных изменений по сравнению с исходным состоянием не выявили. Снижение прочностных характеристик преград (сталь 45 с  $\sigma_v=600$  МПа, алюминиевые сплавы) при постоянных параметрах проникающей струи сопровождались углублением каверны (рис. 1) и отличиями в дифракционной картине. Так, по сравнению с рентгенограммами от недеформированного материала уровень и равномерность распределения почернения по окружности дифракционного кольца сохранялись только на рентгенограммах, полученных от слоев образца, удаленных от поверхности первоначального соударения до 0.25 глубины каверны. По мере приближения точки рентгеновской съемки ко дну каверны размытие дифракционной линии увеличивалось. Наряду с этим наблюдалось рассеяние исходной кристаллической текстуры с последующим ее восстановлением до первоначального вида.

Результаты проведенных экспериментов и рентгенодифракционных исследований, выполненных ранее с помощью характеристического и «белого» рентгеновского излучения на модельных образцах из крупнозернистого алюминия АВ-0 [7], позволяют утверждать, что распространение ударной волны, возникающей при соударении высокоскоростного ударника и преграды, сопровождается интенсивной фрагментацией (дроблением) структурных элементов материала преграды и увеличением разориентировок между фрагментами.

Высказанное утверждение о характере структурных изменений нашло подтверждение в металлографических исследованиях. Можно видеть, что следы грубого скольжения, формоизменение и переориентация зерен простираются от края каверны в глубь материала на расстояние в несколько диаметров зерна. Как показали наблюдения, выполненные с помощью электронной микроскопии, пластическая деформация в металлических преградах любой прочности сильно неоднородна. В высокопрочных сталях и титановом сплаве она сопровождается образованием полос адиабатического сдвига (рис. 2), инициирующих возникновение трещин. В менее прочных материалах — появлением токовой деформации. Токовая деформация обнаруживает себя через каналы неоднородной травимости, которые представляют собой ориентированные цепочки пор травления (рис. 3). Можно выделить два пространственных масштаба в описании этих каналов. Первый соответствует узким (шириной до  $\sim 10$  мкм) каналам, ограниченным тонкими ( $\sim 1$  мкм) стенками. Второй — полосам шириной до 500 мкм, сформированным из групп узких каналов. Считая, что повышенной травимостью обладают объемы металла с высоким уровнем запасенной (латентной) упругой энергии, можно предположить, что узкие каналы соответствуют местам диссипации энергии пластической деформации с образованием самоорганизованных дефектных (дислокационных) структур, нерастравленные участки (стенки) — линиям токовой пластической деформации (схематически показаны на рис. 4). Расположение пор травления отражает упорядоченность дефектной структуры металла.

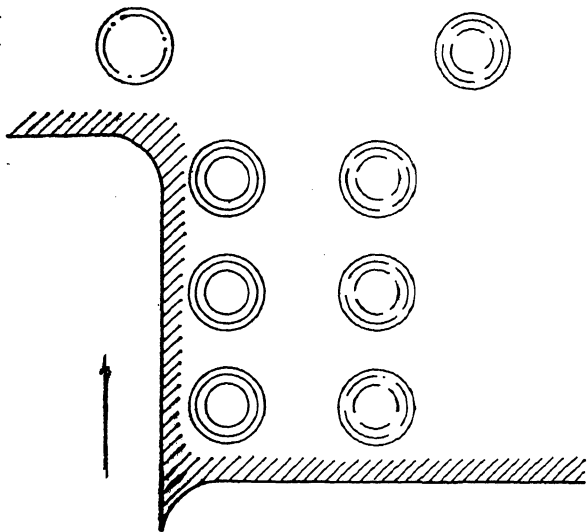


Рис. 1. Микрорентгенограммы стали 45 в разных точках съемки относительно края каверны (она справа).

В соответствии с терминологией и результатами работ [5, 8] токовая пластическая деформация может быть представлена функцией распределения по скоростям движения микропотоков, что согласуется с предложениями о турбулентности пластической деформации при скоростном внедрении, высказанными ранее [9].

Возможность реализации механизмов токовой пластической неустойчивости с возникновением струйных течений (микропотоков) дает основание использовать для описания процесса высокоскоростного проникания плоских струй, представления гидродинамической теории [10-12].

С учетом вязкого трения между микропотоками, которое эквивалентно турбулентному напряжению в уравнениях Рейнольдса [13], система уравнений в модифицированной гидродинамической теории проникания [11, 12] может быть записана в виде

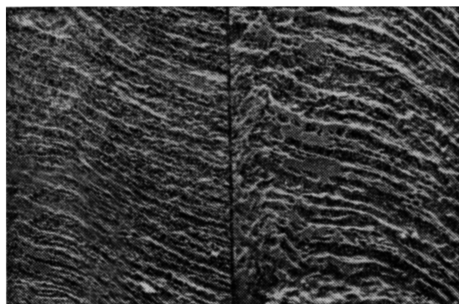


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения образца из титанового сплава в боковой области каверны (100 $\times$ ).

Рис. 3. Токовая деформация в алюминиевом сплаве Д16 (150 $\times$ ).

$$\rho_1 l \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{u} \left( H_2 + \frac{1}{2} \rho_2 u^2 + \mu_2 \dot{\epsilon}_2 + \mu_T \frac{\Delta u}{\Delta h} \right), \quad (1)$$

$$0.5 \rho_1 (v-u)^2 + \mu_1 \cdot \dot{\epsilon}_1 + H_1 = 0.5 \rho_2 u^2 + \mu_2 \dot{\epsilon}_2 + H_2 + \mu_T \frac{\Delta u}{\Delta h}, \quad (2)$$

$$\frac{dl}{dt} = -(v-u), \quad (3)$$

где  $l$  — длина струи в момент времени  $t$ ;  $v$  — скорость струи,  $u$  — скорость проникания;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  — плотность струи и преграды соответственно;  $H_1$  и  $H_2$  — константы, характеризующие прочность струи (1) и преграды (2);  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — коэффициенты динамической вязкости струи (1) и преграды (2);  $\dot{\epsilon}_1$  и  $\dot{\epsilon}_2$  — скорость деформации в струе и преграде;  $\Delta u$  — ширина распределения микропотоков по скоростям;  $\Delta h$  — расстояние между микропотоками и коэффициент вязкости между ними  $\mu_T$ .

В приведенной системе уравнение (1) описывает движение струи, соотношение (2) характеризует баланс напряжений на контактной поверхности, а (3) — изменение длины струи —  $l$ . Оценим параметры системы применительно к нашему случаю. По аналогии с работой [11] примем  $\dot{\epsilon}_1 = (v-u)/h_1$  и  $\dot{\epsilon}_2 = u/h_2$ , где  $h_1$  — ширина струи,  $h_2$  — ширина зоны пластической деформации. Если считать, что ширина зоны пластической деформации в преграде равна ширине струи, то из решения системы с учетом значений  $\dot{\epsilon}_1$  и  $\dot{\epsilon}_2$  находится критическая скорость струи  $v_{кр}$ , при которой прекращается проникание в преграду ( $u=0$ ),

$$v_{кр} = \frac{\mu_1}{\rho_1 h_1} \left( \sqrt{1 + \frac{2(H_2 - H_1) \rho_1 h_1^2}{\mu_1^2}} + \frac{2\mu_T \Delta u \rho_1 h_1^2}{\mu_1^2 \Delta h} - 1 \right). \quad (4)$$

Из полученного соотношения можно видеть, что чем больше размытие функции распределения по скоростям микропотоков, тем больше критическая скорость и меньше глубина внедрения струи. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными о внедрении медных струй со скоростью  $v_0 \approx 3.0$  км/с в алюминиевые преграды (рис. 5). Точка с координатами  $0.5 \cdot 10^{-2}$  (2, 3) отвечает прониканию струи в преграду алюминия марки А998. Большая глубина каверны, чем это следует из гидродинамической теории, очевидно, связана с инерционным движением материала преграды. При высоких начальных скоростях струи ( $v_0 \geq 4$  км/с), когда параметрами  $H_1$ ,  $H_2$  в уравнениях (1) и (2) можно пренебречь, а коэффициент динамической вязкости между микропотоками деформации может быть определен как  $\mu_T = \rho_2 \cdot \Delta u \cdot \Delta h$  [13], уравнение (4) преобразуется к виду

$$v_{кр} = \Delta u \sqrt{\frac{2\rho_2}{\rho_1}}$$

для идеальной несжимаемой жидкости или

$$v_{кр} = \frac{\mu_1}{\rho_1 h_1} \left( \sqrt{1 + \frac{2\rho_2 \Delta u^2 \rho_1 h_1^2}{\mu_1^2}} - 1 \right)$$

для вязкой несжимаемой жидкости.

Эксперименты, проведенные на разных материалах, показали, что ширина функции распределения по скоростям может изменяться в широких пределах — от 10 до 200 м/с. Коэффициент вязкости между микропотоками  $\mu_T$  по физической сути является коэффициентом турбулентной вязкости, и его значение в общем случае можно оценить по выражению [14]

$$\mu_T = \lambda \rho_2 u_1 \cdot \Delta h, \quad (5)$$

где  $u_1$  — массовая скорость частиц,  $\lambda = \text{const}$ .

Прочностные сопротивления струи и преграды в соответствии с работой [15] оцениваются в виде  $H_1 = p_{E1}$  и  $H_2 = \beta p_{E2}$ , здесь  $p_{Ei}$  — пределы упругости Гюгонио, а  $\beta \approx 2$ . С учетом всех этих значений были рассчитаны критические скорости проникания медной струи ( $v_0 \approx 3$  км/с) в преграды из алюминиевого сплава Д-16 и стали марки Ст3. Расчетные и экспериментальные (полученные с помощью метода разнесенных преград на рентгеновской установке РАП-600 в работе [16]) значения  $v_{кр}$  приведены в таблице, из которой видна вполне удовлетворительная сходимость результатов.

Материал преграды	$p_E$ , ГПа	$\Delta u$ , м/с	$\mu_T$ , Па · с	$\Delta L$ , м	$v_{кр}^{эксп}$ , м/с	$v_{кр}^{теор}$ , м/с
Д16	0.5	100	160	$7 \cdot 10^{-6}$	$470 \pm 30$	480
Ст3	0.65	70	470	$10^{-5}$	$590 \pm 35$	630

Если принять в качестве верхней границы для  $\mu_2$  величину  $\mu_T$ , то границы влияния вязкого трения между микропотоками определяются следующим соотношением (с учетом аппроксимации для квадратного корня в выражении (4)):

$$\frac{\Delta u}{H_2 - H_1} \Delta L \geq 0.2.$$

Подстановка значений  $r_E$  [16],  $\Delta u$ ,  $\Delta L$  определяет пары материалов струя—преграда, для которых это соотношение выполняется. К таким парам относятся, например, медь—алюминий, сталь—алюминий, сталь—медь.

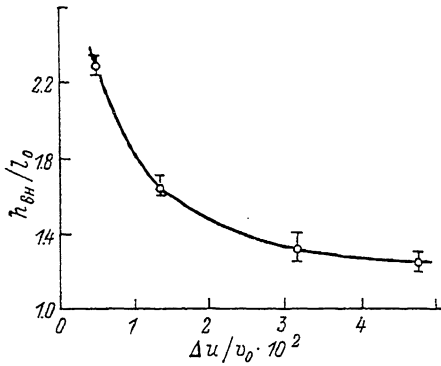


Рис. 5. Зависимость нормированной глубины проникания струи от относительной ширины распределения микропотоков по скоростям.

тивных струй в преграды позволяет учитывать вязкое трение между микропотоками в процессе динамического деформирования материала преграды и дает реальные значения глубины проникания струи.

#### Список литературы

- [1] Понд Р., Гласс К. // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 428—467.
- [2] Мосс Дж. Л. // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Metallurgia, 1984. С. 30—40.
- [3] Ольсон Г. Б., Мескол Дж. Ф., Азрин М. // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Metallurgia, 1984. С. 67—89.
- [4] Лихачев В. А., Мецержков Ю. И., Андреев Ф. Н. и др. // Изв. вузов. Физика. 1984. № 6. С. 123—125.
- [5] Диваков А. К., Козанчик Л. С., Мецержков Ю. И. и др. // ПМТФ. 1987. № 3. С. 135—144.
- [6] Шушко Л. А., Шехтер Б. И., Крыськов С. Л. // ФГВ. 1975. № 2. С. 264—270.
- [7] Савенков Г. Г., Баратин Б. К. // Пластическая деформация материалов в условиях внешних энергетических воздействий. Новокузнецк, 1988. С. 62—63.
- [8] Мецержков Ю. И. // Поверхность. 1988. № 3. С. 101—111.
- [9] Баратин Б. К., Савенков Г. Г. // Докл. IV Всесоюз. совещания по детонации. Т. 2. Черноголовка, 1988. С. 194—197.
- [10] Сагомоян А. Я. Проникание. М., 1974. 300 с.
- [11] Козлов В. С. // ПП. 1986. № 3. С. 47—52.
- [12] Томашевич И. И. // ФГВ. 1987. № 2. С. 97—101.
- [13] Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 736 с.
- [14] Лаврентьев Н. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 408 с.
- [15] Chow P. C., Flis W. J. // Propellents, Explosives, Pyrotechnics. 1984. N 4. P. 99—114.
- [16] Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.

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

Поступило в Редакцию  
24 ноября 1989 г.  
В окончательной редакции  
25 мая 1990 г.