

УДК 539.219

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПРЕГРАДЫ ПРИ УДАРЕ УДЛИНЕННЫМ ТЕЛОМ

© 2022 г. С. Н. Буравова^{1,*}, Е. В. Петров¹,
член-корреспондент РАН М. И. Алымов¹, В. О. Копытский¹

Поступило 05.04.2022 г.

После доработки 05.04.2022 г.

Принято к публикации 09.06.2022 г.

Анализ волновой картины взаимодействия удлинённого ударника с преградой позволил установить ряд ранее не известных особенностей процесса. Всю длину ударника можно разделить на участки, где волновая картина повторяет начальную фазу удара, при этом роль преграды исполняет материал ударника. На протяжении всего процесса взаимодействия двух тел массовая скорость и давление за фронтом ударной волны, движущихся вдоль боковой грани, имеют постоянные значения, равные (0.25–0.32) начальной величины. Сам цикл характеризуется двумя стадиями. На первой стадии сближение боковых волн разгрузки на контактной поверхности приводит к установлению нулевого давления — между ударными волнами в преграде и ударнике образуется прослойка разгруженного материала, при этом внедрение ударника прекращается. Откольная иглоподобная трещина по оси симметрии появляется в результате фокусировки боковых волн разгрузки. Вторая стадия характеризуется затуханием ударной волны. Набегающий поток, скорость которого равна скорости удара, тормозится на фронте затухающей волны, что приводит к росту давления и образованию импульсов сжатия. Приход импульсов сжатия на преграду восстанавливает прерванный процесс внедрения ударника и создает новые откольные повреждения в форме колец вокруг иглоподобного откола, как результат интерференции волн разгрузки, источниками которых являются откольные трещины, образованные ранее, и боковая грань ударника.

Ключевые слова: ударник, взрывное нагружение, ударная волна, волна разгрузки, проникание, “пробка”

DOI: 10.31857/S2686740022060050

Трудность исследования импульсного разрушения материала связана с отсутствием возможности изучать процесс непосредственно в его развитии. Выводы, как правило, делаются на основе сохранённых после нагружения образцов. Однако всегда возникает вопрос о соответствии между развивающимся процессом и выводами, сделанными по сохранённым образцам. Аналитическое решение задачи взаимодействия деформированных тел позволяет избежать неопределённости и выявить сопровождающие явления, которые ранее были неизвестными. Особенности разрушения в процессе внедрения удлинённого ударника следует учитывать в решении технических задач. В частности, это относится к перфорации преграды, что особенно актуально в нефтегазовой от-

расли. Для поиска оптимального пробивания преграды необходимо понимать взаимосвязь ударника с особенностями разрушения. В связи с этим представляет интерес рассмотреть влияние длины ударника на повреждаемость преграды. В работе особое внимание уделено физическим процессам, сопровождающим процесс внедрения удлинённого ударника в преграду.

В момент удара одновременно с ударными волнами в преграде и ударнике возникает центрированная волна разгрузки (с тороидальными характеристиками для ударника цилиндрической формы и плоскими характеристиками для брускообразного). Источником центрированной волны разгрузки является граница контактной поверхности. Разгрузка приводит к искривлению фронта ударной волны и снижению ее амплитуды. Впервые аналитическое решение взаимодействия ударной волны и волны разгрузки при подводных взрывах описано в работе [1]. Использование малого параметра, метода характеристик и удачная замена переменных позволили авторам показать, что траектории точек пересечения

¹ *Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Черноголовка, Московская обл., Россия*
*E-mail: svburavova@yandex.ru

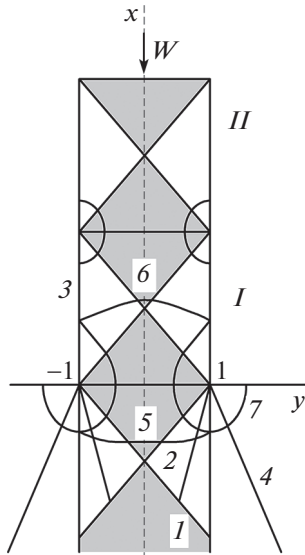


Рис. 1. Схема волновой картины импульсного взаимодействия твердых тел: I – траектория точки пересечения головной характеристики центрированной волны разгрузки (траектория s_0) с фронтом ударной волны; 2 – промежуточная траектория s ; 3 – траектория точки пересечения фронта ударной волны с характеристикой, направленной вдоль боковой грани ударника; 4 – траектория точки пересечения фронта ударной волны с характеристикой s_H , где H – динамический предел текучести Гюгонио; 5 – участок невозмущенного фронта ударной волны в преграде; 6 – участок фронта ударной волны, в зоне торможения; 7 – область боковой разгрузки; W – скорость набегающего на фронт ударной волны потока, равная скорости удара; I – первый пространственный цикл; II – второй пространственный цикл (серым цветом обозначена область, где амплитуда ударной волны сохраняет первоначальное значение).

фронта ударной волны с характеристиками волн разгрузки не зависят от времени. В данной работе применен подход авторов [1] к задаче ударного взаимодействия двух деформируемых твердых тел.

В качестве малого параметра принята величина $s = \frac{u}{c_0}$, через которую можно выразить все параметры ударно сжатого материала:

$$\frac{D}{c_0} = 1 + bs, \quad \frac{c}{c_0} = 1 + (2b - 1)s, \quad \frac{P}{\rho_0 c_0^2} = \frac{u}{c_0} = s,$$

где D – скорость ударной волны, ρ – плотность, P – давление, u – массовая скорость, c_0 и b – параметры адиабаты материала: $D = c_0 + bu$.

Уравнение характеристик центрированной волны разгрузки (координата x направлена перпендикулярно к поверхности преграды, координата y – параллельно), в новых переменных:

$$x = (1 + X)\tau, \quad y = 1 - Y\tau, \quad \tau = \frac{c_0 t}{r_0},$$

принимает вид

$$X + \frac{Y^2}{2} = 2bs,$$

где τ – безразмерное время, r_0 – радиус ударника, s_0 – малый параметр, относящийся к головной характеристике, s – текущий параметр.

Тогда уравнение искривленного фронта ударной волны представляется в виде

$$X = bs_0 + \sqrt{2bs_0} \frac{Y}{2} - \frac{Y^2}{4},$$

что дает возможность выразить координаты X и Y через малый параметр s :

$$X = 4b\sqrt{s_0 s} - bs_0 - 2bs, \quad Y = 2\sqrt{2bs} - \sqrt{2bs_0}.$$

В новых координатах движение не зависит от времени.

На рис. 1 приведена схема волновой картины динамического взаимодействия твердых тел (ударник в форме цилиндра или бруска, преграда – полуплоскость). На начальной стадии внедрения ударника ударная волна, невозмущенная разгрузкой, ограничена сходящимися траекториями точек пересечения головных характеристик с фронтом ударной волны (траектории s_0 , рис. 1, линия I). Сближение волн разгрузки на контактной поверхности приводит к установлению нулевого давления, вследствие чего внедрение ударника в преграду останавливается. Ударные волны в преграде и ударнике отделяются друг от друга и продолжают движение самостоятельно, так как между ними образуется область разгруженного материала.

Угол наклона траекторий φ зависит от интенсивности и описывается выражением

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{dx}{dy} = -\frac{1+X}{Y} = \\ &= -\frac{1 + 2\sqrt{2bs_0} - bs_0 - 2bs}{2\sqrt{2bs} - \sqrt{2bs_0}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Из выражения (1) следует важный факт – траектории являются прямыми линиями и зависят только от начальной нагрузки и давления на характеристиках волн разгрузки. Траектория s , направленная вдоль боковой грани ударника ($\varphi = 0.5\pi$), несет давление, равное одной четвертой начального давления (в случае цилиндрической симметрии $P_B = 0.32P_0$ [1]). Отражение ударной волны на боковых гранях носит регулярный характер. Скорость перемещения фронта с учетом наклонного положения $\frac{D}{c_0} = 1 + 0.5bs_0$ равна ско-

рости звука сжатого материала $\frac{c}{c_0} = 1 + \frac{2bs_0}{4}$. Поэтому возмущение не может изменить скорость

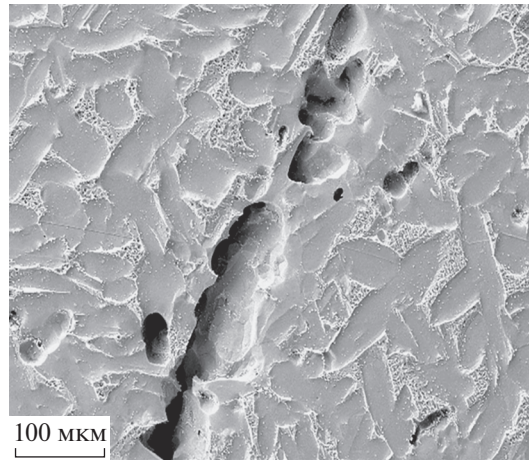


Рис. 2. Микрофотография травленной поверхности шлифа после обжатия цилиндрического образца детонационной волной.

перемещения ударной волны вдоль боковой грани. Снижение давления до нуля происходит во второй боковой волне разгрузки, веер характеристик которой сопрягается с характеристиками центрированной волны разгрузки. На протяжении всего процесса соударения давление ударной волны на боковой поверхности остается постоянным, равным $P_B = 0.25P_0$ ($P_B = 0.32P_0$ для цилиндра).

Упрочнение материала за фронтом ударной волны происходит в слое, толщина которого $h_0 = \frac{(1 + bs_0)}{\sqrt{2bs_H}}$ определяется пересечением траекторий s_0 и s_H (позиция 4 на рис. 1), где H – динамический предел текучести.

В момент $\tau = 1$ волны разгрузки встречаются на оси симметрии, где в зоне интерференции волн (или фокусировки) возникает откольная повреждаемость. Ударник “жалит” преграду. Согласно откольной модели локализации пластической деформации [2] деформационные полосы возникают, когда напряжение в зоне интерференции волн не превышает динамическую прочность s_{spall} , и материал сохраняет свою сплошность.

Следует заметить, что свойство образовывать иглоподобные откольные трещины в преграде при фокусировке волн разгрузки ранее известно не было, хотя откольные трещины и полосы сдвига наблюдаются экспериментально. Например, при повреждении лопаток паровых турбин на электростанциях или при кавитационной эрозии судовых винтов [3], при действии струи кумулятивного заряда [4, 5]. В отличие от хорошо исследованного откола, который используется для определения откольной прочности материала [6], фокусированный откол не изучен.

Рисунок 2 иллюстрирует иглоподобное откольное разрушение, возникшее при обжатии цилиндрического бронзового образца. Несмотря на то что кумуляция в осевой зоне образца приводит к значительному росту давления, обращает на себя внимание факт сохранения исходной микроструктуры образца вблизи полосы локализованной деформации.

На второй стадии внедрения ударника, в области расходящихся траекторий s_0 , ударная волна испытывает резкое затухание амплитуды, оценить которую можно по величине давления той характеристики s , которая в этот момент пересекает встречную траекторию s_0 . Волновая картина в ударнике более сложная из-за наличия высокоскоростного набегающего потока, скорость которого равна скорости удара W . Торможение потока на фронте затухающей волны приводит к восстановлению давления P_0 . Как видно на рис. 1, на протяжении всего процесса взаимодействия деформированных тел, давление за фронтом ударной волны в центральной части ударника остается постоянным, равным P_0 , а на гранях – $P_B = (0.25 - 0.32)P_0$. Серым цветом на рис. 1 обозначена область, где амплитуда ударной волны сохраняет первоначальное значение, а белым цветом окрашены участки после разгрузки.

В момент $\tau = \frac{2}{\sqrt{2bs_0}}$, когда траектории s_0 головных характеристик выходят на противоположные боковые грани ударника, площадь фронта становится равной сечению ударника. Выход импульса сжатия на свободную боковую поверхность сопровождается образованием новой централизованной волны разгрузки. Дальнейший процесс распространения ударной волны повторяет волновую картину начальной стадии удара. При этом роль преграды исполняет материал ударника, че-

рез который прошла затухающая ударная волна. Процесс торможения удлиненного ударника оказался периодическим. Всю длину ударника можно разделить на пространственные циклы, в которых волновая картина повторяется. Длина цикла постоянна и равна

$$S_0 = \frac{2}{\sqrt{2bs_0}} + \frac{\sqrt{2bs_0}}{2}.$$

Каждый цикл состоит из двух стадий, которые характеризуются снижением площади невозмущенной ударной волны и последующего восстановления давления за счет торможения встречного потока. Торможение ударника сопровождается образованием потока импульсов сжатия, направленных к преграде. Именно внутреннее торможение ударника приводит к возобновлению прерванного процесса внедрения ударника в преграду. Величина импульсов сжатия, приходящих на контактную поверхность, зависит от расстояния, где имело место торможение. По мере удаления от мест торможения ($S_0, 2S_0, 3S_0$ и т.д.) величина импульса, пришедшего на преграду, заметно снижается.

Интересно отметить, что приход первого импульса сжатия (S_0) на контактную поверхность сопровождается образованием новой откольной повреждаемости в виде кольца, поскольку боковая грань и иглоподобная трещина становятся источниками разгрузки. Образование кольцевого тела перед внедряющимся снарядом, названный “пробкой”, — хорошо известный факт [7]. Однако механизм образования “пробки” на основе ясных физических законов до сих пор не описан в литературе. Известно, что поверхность “пробки” при баллистических скоростях нагружения ограничена полосой локализованной деформации (адиабатические полосы сдвига) в форме кольца. Попытка объяснить образование деформационных полос термомеханической моделью локализации деформации [8], основанной на тепловом разупрочнении материала, оказалась не состоятельной [9].

Приход следующего второго потока импульсов сжатия ($2S_0$) на преграду сопровождается образованием дополнительных двух кольцевых откольных повреждений, которые разрушают ранее сформировавшуюся “пробку”. Процесс торможения и внедрения ударника заканчивается, когда ударная волна выходит на торцевую поверхность ударника.

Ниже приведен конкретный пример, иллюстрирующий последовательный характер разрушения преграды в условиях импульсного нагружения удлиненным ударником.

Пример. Исходные данные: $P_0 = 19.07$ ГПа ($s_0 = 0.1$), $\rho = 7.85$ г/м³, ударная адиабата: $D = 4.63 +$

$+ 1.33u$, $P_{spall} = 2.4$ ГПа ($s_{spall} = 0.014$), $P_H = 1.7$ ГПа ($s_H = 0.01$).

Тогда давление на боковой грани ударника составит $P_B = 0.32P_0 = 6.1$ ГПа и остается неизменным в течение всего процесса внедрения, длина пространственного цикла $S_0 = 4.14$, толщина упрочненного слоя $h_0 = 11.3$. Иголоподобная повреждаемость реализуется в форме трещины ($s_0 > s_{spall}$). Приход первого импульса (с максимальным давлением 6.1 ГПа ($s_I = 0.035$)) вызывает образование откольной кольцевой трещины ($s_1 > s_{spall}$). Максимальное давление второго импульса сжатия (1.96 ГПа ($s_{II} = 0.011$)), пришедшего на контактную поверхность, ниже откольной прочности ($s_H < s_{II} < s_{spall}$). В результате в преграде сформируются две кольцевые полосы локализованной деформации, которые разрушат ранее образованную “пробку”. Последующие импульсы сжатия с удаленных участков ударника вырождаются в звуковые волны и не могут изменить ранее возникшую повреждаемость преграды.

В заключение следует отметить главную особенность импульсного взаимодействия двух деформированных тел — разрушение преграды протекает последовательно. Другая особенность процесса — прерывистый характер внедрения ударника в преграду, как следствие цикличности торможения ударника.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСМАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриб А.А., Рябинин Л.Г., Христианович С.А. Об отражении плоской ударной волны в воде от свободной поверхности // ПММ. 1956. № 4. С. 532–544.
2. Буравова С.Н., Гордолопов Ю.А. Природа образования полос адиабатического сдвига // ДАН. 2007. Т. 417. № 6. С. 756–759. <https://doi.org/10.1134/S1028335807120063>
3. Buravova S.N., Gordolov Y.A. Cavitation erosion as a kind of dynamic damage // Int. J. Fract. 2011. V. 170. Iss. 1. P. 83–93. <https://doi.org/10.1007/s10704-011-9604-z>
4. Raftenberg M.N. A Shear Banding Model for penetration calculation. Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Groundry, ARL-TR-2221, 2000. 67 p.
5. Rittel D., Osovski S. Dynamic failure by adiabatic shear banding // Int. J. Fract. 2010. V. 162. Iss. 1–2. P. 177–185. <https://doi.org/10.1007/s10704-010-9475-8>
6. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М: Янус-К, 1996. 408 с.
7. Wright T.W. The physics and mathematics of adiabatic shear bands. UK: Cambridge University Press, 2002. 260 p.

8. Zener C., Hollomon J.H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel // J. Appl. Phys. 1944. V. 15. Iss. 22. P. 22–32.
<https://doi.org/10.1063/1.1707363>
9. Buravova S.N., Petrov E.V. Strain localization under impulse load // Forces in Mechanics. 2021. V. 3. 100015. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100015>

MATERIAL DAMAGE OF THE BARRIER CAUSED BY IMPACT WITH AN ELONGATED BODY

S. N. Buravova^a, E. V. Petrov^a, Corresponding Member of the RAS M. I. Alymov^a,
and V. O. Kopytskiy^a

^a *Merzhanov Institute of Structural Macrodynamics and Materials Science Russian Academy of Sciences,
Chernogolovka, Moscow Region, Russia*

The wave pattern analysis of the elongated striker interaction with the barrier allowed us to establish a number of previously unknown features of the process. The entire length of the striker can be divided into sections where the wave pattern repeats the initial phase of the impact, while the barrier role is played by the striker material. Throughout the entire process of two bodies interaction, the mass velocity and pressure behind the shock wave front moving along the side face have constant values equal to (0.25–0.32) of the initial value. The cycle itself is characterized by two stages. At the first stage, the convergence of the lateral unloading waves on the contact surface leads to the establishment of zero pressure – a layer of unloaded material is formed between the shock waves in the barrier and the striker, while the striker penetration stops. A needle-like crack along the symmetry axis appears as a result of focusing the unloading lateral waves. The second stage is characterized by shock wave attenuation. The incoming flow, whose velocity is equal to the impact velocity, is slowed down at the attenuation wave front, which leads to an increase in pressure and the compression pulses formation. The arrival of compression pulses on the barrier restores the interrupted process of the striker penetration and creates new spall damage in the rings form around the needle-like spall, as a result of the unloading waves interference, the sources of which are the spall cracks formed earlier and the striker side face.

Keywords: striker, explosive loading, shock wave, unloading wave, penetration, “plug”