

03:05

К определению глубины проникания пористых ударников при гиперскоростном взаимодействии

© С.В. Федоров

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005 Москва, Россия
e-mail: sm4@sm.bmstu.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2007 г.)

На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред исследованы особенности проникания удлинённых пористых ударников в стальную преграду в гидродинамическом режиме (скорость взаимодействия — несколько километров в секунду). Установлено, что глубина проникания пористых ударников превышает величину, определяемую на основании гидродинамической теории в предположении модели несжимаемой жидкости. Данное превышение связывается с изменением механизма проникания пористого ударника, обусловленным формированием в нем присоединённой ударной волны. Предложена простая модель для прогнозирования пробивного действия удлинённых пористых ударников.

PACS: 07.05.Tr, 62.50.+p

Как было показано в [1,2] экспериментально и на основе численного моделирования, пористый ударник, изготовленный из металлических опилок, проникает в гидродинамическом режиме (с растеканием материала ударника по поверхности кратера в преграде в процессе проникания) глубже, чем равный ему по массе и диаметру монолитный. Причем с увеличением степени разуплотнения пористого ударника его преимущество в проникающей способности над монолитным возрастает. Однако представленные в [1,2] результаты носят частный характер и не дают четкого указания физических причин обнаруженного эффекта, что, в свою очередь, не позволяет выйти на какие-либо обобщения относительно характера его проявления в различных условиях.

Целью настоящей работы являлось углубление представлений о механизме проникания пористых ударников с возможностью выхода на прогнозирование их пробивного действия. Исследования проводились на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред. Материал преграды рассматривался как сжимаемая упругопластическая среда с баротропным уравнением состояния в форме Тэта [3]. Модель поведения материала пористого ударника базировалась на известном подходе, предполагающем, что выборка пор в пористой среде происходит при нулевом давлении, после чего она ведет себя как монолитная и подчиняется уравнению состояния в форме Ми-Грюнайзена [3]. В соответствии с данным подходом связь между давлением и плотностью при ударно-волновом нагружении пористой среды устанавливалась ударной адиабатой Зельдовича–Забабахина [4]. Возможность реализации в пористой среде при ее последующей разгрузке и разуплотнении состояния всестороннего растяжения исключалась (отрицательное давление при его возникновении занулялось). Прочность материала ударника не учитывалась.

Так как в [1,2] сравнивалось пробивное действие монолитных и пористых ударников при фиксированных диаметре и массе, то лежащая на поверхности одна из причин большего пробития пористых ударников была связана, очевидно, с увеличением длины ударника по мере его разуплотнения. Для исключения влияния данного фактора в настоящей работе моделировалось проникание геометрически идентичных монолитных и пористых ударников (имеющих одинаковые диаметр и длину). Кроме того, в отличие от [1,2] рассматривались ударники с достаточно большим удлинением (отношением длины к диаметру), для которых основной вклад в пробитие достигается в стационарном (установившемся) режиме проникания. Рассмотрение удлинённых ударников позволяло при последующем анализе результатов иметь в качестве базы для сравнения гидродинамическую теорию проникания [5], хорошо описывающую установившуюся стадию высокоскоростного проникания монолитных металлических ударников. В качестве материала преграды во всех случаях принималась сталь с пределом текучести 400 МПа.

На рис. 1 проиллюстрирована форма каверны в стальной преграде при действии медных пористых ударников с различной пористостью. Пористость ударника характеризуется степенью его разуплотнения α (по отношению к монолитному), определяемой как $\alpha = \rho_{00p}/\rho_{0p}$, где ρ_{00p} — начальная плотность пористого материала, ρ_{0p} — нормальная пористость монолита. Длина ударников составляла 10 диаметров, скорость взаимодействия — 4 км/с.

Изменение глубины пробития L , отнесенной к начальной длине ударника l_0 , для рассматриваемых медных пористых ударников в зависимости от параметра α приведено на рис. 2. Глубина пробития в численных расчетах определялась на момент полного исчерпания длины ударника (прирост глубины на последующей стадии инерционного движения среды относительно

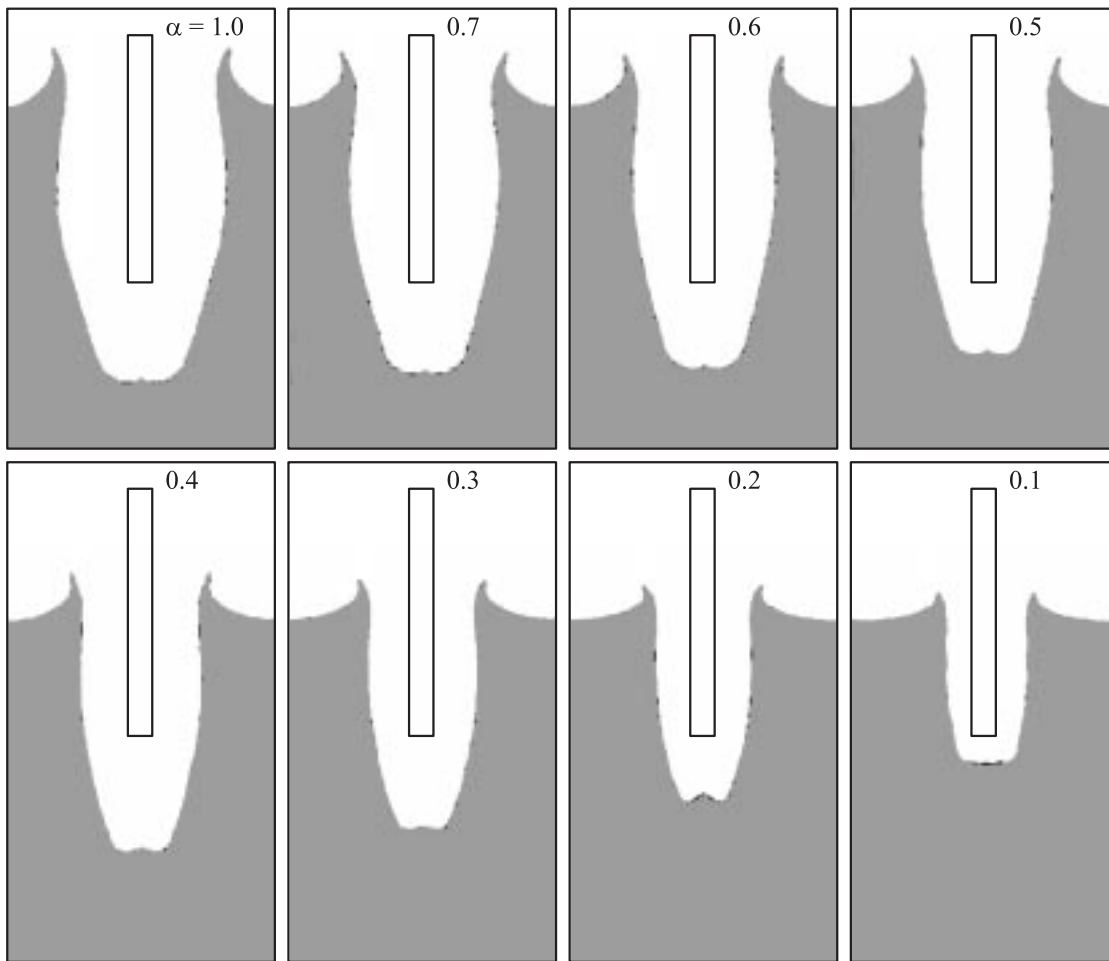


Рис. 1. Форма каверны в стальной преграде при проникании медных ударников с различной пористостью (длина ударников равна 10 диаметрам, скорость 4 км/с).

невелик и во внимание не принимался). Из сравнения результатов численного моделирования с прогнозом, даваемым гидродинамической теорией проникания в приближении модели несжимаемой жидкости (также проиллюстрированном на рис. 2), видно, что пробитие пористых ударников ($\alpha < 1$) превышает рассчитываемое по формуле Лаврентьева [5] значение

$$L/l_0 = \sqrt{\rho_{00p}/\rho_{0b}} = \sqrt{\alpha} \sqrt{\rho_{0p}/\rho_{0b}}, \quad (1)$$

где ρ_{0b} — плотность материала преграды. С увеличением степени разуплотнения (уменьшением параметра α) относительный выигрыш в глубине пробития пористого ударника по сравнению с имеющим те же плотность и размеры монолитным (для которого хорошо „работает“ формула Лаврентьева) возрастает.

На рис. 3 приведен вид каверн в стальной преграде, полученных при моделировании проникания монолитного алюминиевого ударника и равного ему по плотности ($\alpha = 0.303$) и размерам пористого медного. Каверна, образованная пористым ударником, существенно (примерно на 35%) больше по глубине, но имеет меньший поперечный размер. Объем каверн в обоих случаях

приблизительно одинаков. Результаты, подобные приведенным на рис. 2, были получены при моделировании проникания пористых ударников и из других материалов.

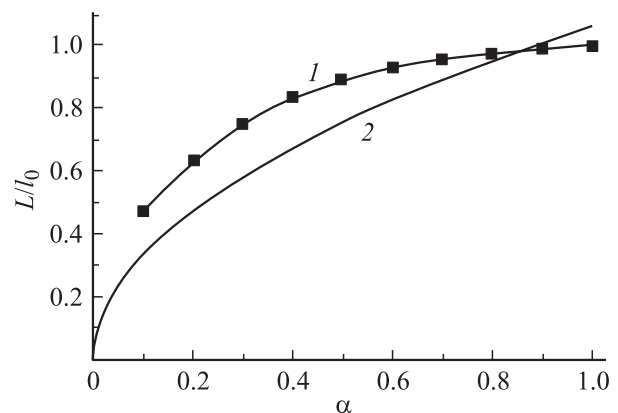


Рис. 2. Глубина пробития в стальной преграде медных пористых ударников в зависимости от степени их разуплотнения (1 — численный расчет, 2 — гидродинамическая теория проникания в предположении несжимаемости материалов).

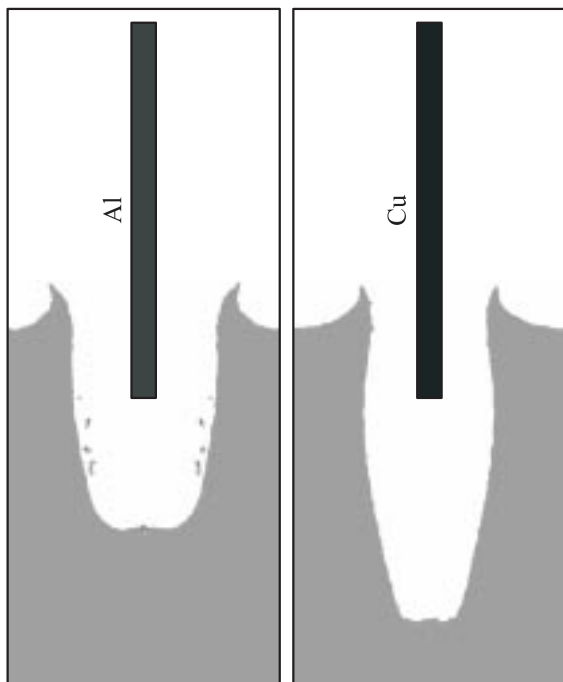


Рис. 3. Форма каверны в стальной преграде при проникании монолитного алюминиевого и пористого медного ударников равной массы и размеров (скорость 4 km/s).

Таким образом, результаты численного моделирования свидетельствуют об изменении механизма проникания пористых ударников, приводящем к заметным отклонениям глубины их пробития от значения, определяемого соотношением (1). Анализ расчетов позволяет предположить, что эти отклонения связаны с формированием в пористом ударнике в процессе проникания вблизи поверхности контакта с преградой присоединенной ударной волны (факт формирования присоединенной ударной волны в пористом ударнике отмечался и в [1,2]). Формирование присоединенной ударной волны в пористом ударнике обусловлено низкой скоростью звука в пористом материале. Согласно [6], ее значение при объемном содержании воздушных пор в десятки процентов имеет порядок всего лишь десятка метров в секунду. Так что при рассматриваемых скоростях взаимодействия в несколько километров в секунду для пористого ударника должен реализовываться сверхзвуковой режим проникания, предопределяющий наличие присоединенной ударной волны.

Основываясь на данном факте и рассматривая процесс проникания, следуя Лаврентьеву [5], как взаимодействие струй жидкости, можно построить простую модель проникания удлиненного пористого ударника, аналогичную использовавшейся в [7] для случая сверхзвукового взаимодействия струи и преграды из монолитных материалов. Ее математическое описание включает систему соотношений на фронте присоединенной ударной волны в ударнике, условия непрерывности на поверхности контакта ударника и преграды и уравнения Бернулли, связывающие параметры состояния на контактном

разрыве с параметрами на фронте ударной волны для ударника и с параметрами на бесконечности для преграды (материал преграды рассматривается как идеальная несжимаемая жидкость). При этом при записи уравнения Бернулли для ударника дополнительно предполагается, что плотность его материала возрастает скачкообразно на фронте ударной волны, а в дальнейшем (на границе контакта) не изменяется. На основе данной модели для определения глубины проникания пористого ударника получается следующее соотношение:

$$L/l_0 = \sqrt{2 - \rho_{00p}/\rho_{sp}} \sqrt{\rho_{00p}/\rho_{0b}},$$

где ρ_{sp} — плотность материала пористого ударника, приобретаемая на фронте ударной волны. Значение ρ_{sp} определяется с привлечением ударной адиабаты Зельдовича–Забабихина для пористого материала [4]. Получающееся при этом алгебраическое уравнение допускает только численное решение. Однако, как показали расчеты по нему при различных скоростях взаимодействия, плотность материала пористого ударника ρ_{sp} на фронте ударной волны незначительно отличается от нормальной плотности монолита ρ_{0p} (что вполне естественно, так как после полной выборки пор сжимаемость материала резко уменьшается). При дополнительном предположении, что материал пористого ударника уплотняется за фронтом ударной волны до нормальной плотности монолита (т.е. от плотности ρ_{00p} до ρ_{0p}), сформулированная задача разрешается в аналитическом виде, и для глубины проникания пористого ударника получается следующее простое соотношение:

$$L/l_0 = \sqrt{2 - \alpha} \sqrt{\alpha} \sqrt{\rho_{0p}/\rho_{0b}}. \quad (2)$$

Предсказываемая данной формулой зависимость пробития пористого ударника от степени его разуплотнения α практически совпадает с полученной в численных расчетах (рис. 2). Отметим также, что в соответствии с (2) глубина пробития удлиненного пористого ударника получается не зависящей от его скорости (как и глубина пробития монолитного в соответствии с (1)). Очевидно, это справедливо, как и для монолитного, при достаточно высоких скоростях взаимодействия, позволяющих пренебречь прочностными свойствами материалов. При $\alpha = 1$ (монолитный ударник) зависимость (2) переходит в формулу Лаврентьева (1).

Как следует из сравнения соотношений (1) и (2), при одинаковых размерах и массе удлиненный пористый ударник дает глубину пробития в $\sqrt{2-\alpha}$ раз большую, чем монолитный (сравниваемые ударники выполнены в данном случае из различных материалов). В случае монолитного и пористого ударников равной массы и диаметра из одного и того же материала [1,2] прирост глубины пробития пористого ударника будет определяться не только изменением механизма его проникания, но и увеличением его длины, в результате чего соотношение пробития пористого и монолитного ударников составит, согласно (2), $\sqrt{(2-\alpha)/\alpha}$ в пользу пористого

(эти выводы, как уже отмечалось выше, справедливы, если можно пренебречь прочностью преграды).

Учесть прочностные свойства материала преграды при проникании пористого ударника, как и для монолитного, можно на основании так называемой модифицированной гидродинамической теории проникания [8], согласно которой в уравнение Бернулли для преграды включается прочностное сопротивление H_b . В соответствии с данным подходом минимальная скорость пористого ударника $v_{0\min}$, которую он должен иметь, для того чтобы происходило проникание в прочную преграду, получается равной

$$v_{0\min} = \sqrt{\frac{2H_b}{\alpha(2-\alpha)\rho_0\rho_p}}.$$

Пренебрегать влиянием прочности преграды можно, очевидно, если скорость ударника существенно превышает значение, рассчитываемое по приведенной зависимости. С увеличением пористости ударника (уменьшением параметра α), как следует из данной зависимости, значение $v_{0\min}$ возрастает. Например, при $H_b = 4$ ГПа (преграда из высокопрочной стали) для монолитного ($\alpha = 1$) медного ударника $v_{0\min} = 950$ м/с, при объемном содержании воздушных пор 50% ($\alpha = 0.5$) $v_{0\min} = 1100$ м/с, а при увеличении пористости ударника до 90% ($\alpha = 0.1$) эта предельная скорость возрастает до 2200 м/с. Интересно также отметить, что при равных плотностях пористого и монолитного ударников (из разных материалов) величина $v_{0\min}$ для пористого ударника получается в $\sqrt{2-\alpha}$ раз ниже, чем для монолитного.

Список литературы

- [1] *Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Козорезов К.И.* и др. // ДАН. 1997. Т. 355. № 2. С. 192–195.
- [2] *Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Хабибуллин М.В.* и др. // Тр. Междунар. конф. „Математическое моделирование процессов в синергетических системах“. Улан-Удэ: Институт высоких технологий, 1999. С. 165–167.
- [3] *Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А.* и др. *Высокоскоростное взаимодействие тел.* Новосибирск: Наука, 1999.
- [4] *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.* М.: Наука, 1966.
- [5] *Лаврентьев М.А.* // *Успехи математических наук.* 1957. Т. 12. Вып. 4. С. 41–56.
- [6] *Нигматуллин Р.И.* *Основы механики гетерогенных сред.* М.: Наука, 1978.
- [7] *Симонов И.В., Осипенко К.Ю.* // Тез. докл. V Междунар. конф. „Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике“. Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 2000. С. 145.
- [8] *Сагомонян А.Я.* *Проникание.* М.: Изд-во МГУ, 1974.