

Материаловедение

УДК 621.762

О РОЛИ ЭНЕРГИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ И СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ ЧАСТИЦ

С.Е. Алексенцева, И.В. Захаров, А.Л. Кривченко

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Проведен анализ влияния параметров соударения на процесс сверхглубокого проникновения частиц. Определен параметрический принцип, выявляющий возможность сверхглубокого проникновения частиц. Показана роль ударной волны продуктов детонации как фактор предварительного напряжения кристаллической решетки для последующего внедрения частиц. Разработан алгоритм энергетического баланса при сверхглубоком проникании. Предложен механизм сверхглубокого проникания за счет разрыва межмолекулярных и межатомных связей при внедрении частиц. Сделано обоснование размерного интервала проникающих частиц при сверхглубоком проникании.

Ключевые слова: ударные волны, разрушение межатомных связей, модель сверхглубокого проникания, поток высокоскоростных дискретных частиц.

На рубеже 80-х и 90-х годов XX века был обнаружен эффект сверхглубокого проникания ударников малого размера на глубины, в 100 и даже 1000 раз превышающие размер ударников, причем эффект реализуется в нестрогом размерном интервале ударников порядка 1–100 мкм. Поэтому в качестве ударников используют порошковые дискретные частицы. Эффект получил название сверхглубокого проникновения (СГП) частиц. Данный эффект реализован при метании ударников в виде потока плотностью около 1 г/см^3 за счет энергии взрыва в установке взрывного ускорителя. Скорость метания составляет 1–3 км/с, давление соударения порядка 10–15 ГПа. Впервые для метания частиц процесса использован кумулятивный заряд, в кумулятивной выемке которого располагался рабочий объем метаемого порошка [1, 2], а также торцевой способ [3–5].

Основными факторами, характеризующими эффективность пробивного действия ударников любого типа, являются кинетические и геометрические параметры ударника, а также соотношение прочности (плотности, твердости) ударника и преграды. Реальность и место СГП частиц видны, если рассматривать процесс как часть процессов в линейке изменения скоростей, масс и площадей взаимодействия с учетом прочностных характеристик ударника и преграды. Ме-

Светлана Евгеньевна Алексенцева (к.ф.-м.н., доц.), доцент кафедры «Технология твердых химических веществ».

Игорь Владиславович Захаров, ведущий инженер.

Александр Львович Кривченко (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Защита в чрезвычайных ситуациях».

ханизм сверхглубокого проникания проявляется в суммарном воздействии узкого критического интервала скоростей и размеров частиц и химического элементарного состава самих частиц, наложенных на добавочное ударно-волновое воздействие продуктов детонации (ПД). Предварительно рассмотрим данные процессы по возможности изолированно.

Кинетическая энергия ударника в общем случае считается основной характеристикой поражающего действия. В основном все модели соударения высокоскоростных тел с преградами основаны на положении, что объем кратера V_k или объем выбиваемого материала как конечный результат работы кинетической энергии прямо пропорционален кинетической энергии удара снаряда $E_{уд}$, т. е. $V_k \sim E_{уд}$. Абстрагируясь от конкретной формы кратера, приближенно можно считать сопоставимыми по величине условное среднее поперечное сечение кратера по глубине и площадь в поперечнике ударника S . Тогда имеем пропорциональность между глубиной пробития преграды L_k и удельной энергией удара:

$$V_k / S \sim E_{уд} / S,$$

следовательно,

$$L_k \sim E_{уд} / S.$$

Например, кинетическая энергия для шарообразных ударников из прочного элемента вольфрама (плотность $\rho = 19300 \text{ кг/м}^3$) диаметром d разных размеров (16; 4 и 0,1 мм) в скоростном интервале 2–8 км/с отличается внутри интервала в сотни раз, а при сравнении кинетической энергии ударников разных размеров – в миллионы раз (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение кинетической энергии и энергии, распределенной на площади поперечного сечения ударника

Диаметр ударника из вольфрама d , мм	Масса ударника m , г	Кинетическая энергия E , Дж, в интервале скоростей 2–8 км/с	Удельная кинетическая энергия E_s , Дж/мм ² , в интервале скоростей 2–8 км/с
16	41,4	$\sim 80 \cdot 10^3 - 1300 \cdot 10^3$	398,09 – 6468,95
4	0,65	$\sim 2,6 \cdot 10^3 - 21 \cdot 10^3$	207,0 – 1671,97
0,1	0,00001	$\sim 0,02 - 0,32$	2,55 – 40,76

Так, кинетическая энергия $E = mv^2/2$ (m – масса ударника, v – скорость) или плотность энергии в объеме $E = \rho v^2/2$ (ρ – плотность ударника) являются характеристиками, не учитывающими вектор приложения энергии и градиент распределения в области действия. Поэтому не только величина кинетической энергии обеспечивает пробивное действие ударника. Значительную роль играет общее лобовое сопротивление в преграде или площадь поперечного сечения ударника. Величина удельной кинетической энергии, распределенная на площади взаимодействия ударника и преграды, в наших оценках делает сопоставимыми характеристики пробивного действия ударников разных размеров (см. табл. 1, рис. 1).

В первом приближении используем критериальный подход для оценки пробивной силы ударника [3]. По критериальному подходу сравниваются критерий ударника и критерий преграды. Преграда является пробиваемой, если критерий ударника больше или равен критерию преграды $K_{уд} \geq K_{прег}$. В качестве критерия в основном принимается кинетическая энергия или удельная кинетическая энергия.

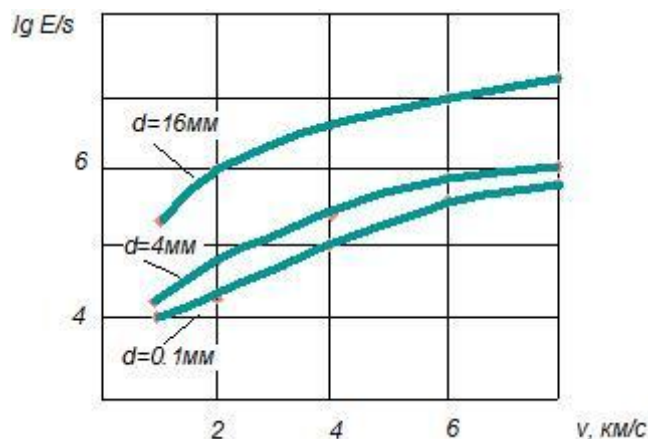


Рис. 1. Удельная энергия ударников из вольфрама диаметром 0,1, 4 и 16 мм

Из сравнения данных кинетической и удельной энергии ударников (см. табл. 1 и 2) видно, что частицы размером около 100 мкм и скоростью 2–3 км/с могут пробить непрочные и даже небронированные преграды. Из практики, например, известно, что пуля автомата Калашникова, имеющая кинетическую энергию 2048 Дж или распределенную на площади соударения с преградой 44,93 Дж/мм², пробивает строительную сталь марки Ст.3 толщиной до 10–11 мм.

Таблица 2

Критерии преград

Тип преграды	Кинетическая энергия, Дж	Удельная кинетическая энергия, Дж/мм ²
Непрочные преграды	100	1
Небронированная техника	300–1000	3–10
Легкобронированная техника	2000–5000	20–50

В общем глубина проникания ударника зависит от площади его поперечного сечения в зоне постоянной прочности (плотности, твердости) ударника и преграды (рис. 2).

Если принять постоянной скорость метания ударника и его массу, то при уменьшении площади поперечного сечения ударника, т. е. уменьшении лобового сопротивления, будет увеличиваться глубина пробития преграды до критического снижения энергии внедряющегося ударника.

Если принять постоянными массу и площадь поперечного сечения ударника (рис. 3), то в нижнем скоростном интервале имеют место процессы деформации ударника – зона *A*. Далее повышение скорости приводит к увеличению пробития преграды – зона *B*. Затем дальнейшее повышение скорости вызывает дробление ударника и, следовательно, снижение глубины пробития преграды – зона *C*. В области увеличения количества фрагментов раздробленного ударника и повышения скорости медленно увеличивается глубина пробития – зона *D* [6]. При дроблении и уменьшении массы появляется разновекторность кинетической энергии и глубина пробития снижается.

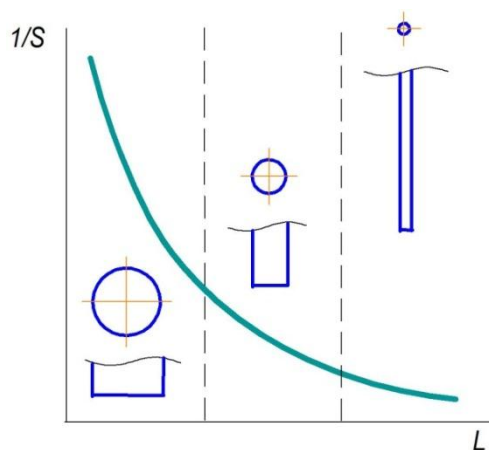


Рис. 2. Общая зависимость глубины проникновения в преграду ударника от его площади поперечного сечения в области их постоянных прочностных параметров

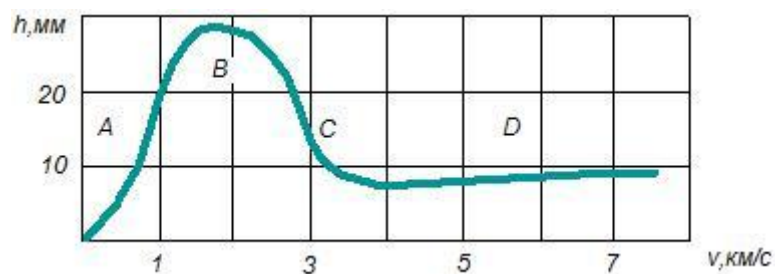


Рис. 3. Зависимость глубины внедрения ударника от скорости метания

Если увеличивать площадь поперечного сечения и скорость метания ударника, то в нижнем скоростном интервале наибольшую глубину пробития дадут ударники с большой площадью поперечного сечения и большой массой. Далее увеличение глубины пробития происходит только с уменьшением площади поперечного сечения и массы ударника. Таким образом, получаем рабочую зону размеров ударников с максимальной глубиной проникания (рис. 4).

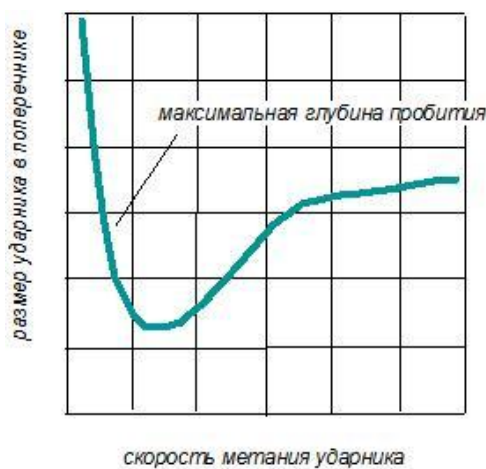


Рис. 4. Зависимость максимальной глубины пробития от диаметра ударника

Суммируя действие всех главных факторов, формулируем принцип пробивания преграды при СГП частиц – «принцип калибров»: площадное поверхностное разрушение переходит в сверхглубокое туннельное пробивание приблизительно того же объема.

Эффект СГП частиц состоит из совокупности двух процессов: ударного воздействия на заготовку газообразных ПД и проникающего действия потока порошковых частиц. Действие процессов параллельно и одновременно. Поэтому исследование вклада энергий ударной волны (УВ) газообразных продуктов детонации и кинетической энергии удара метаемых частиц является необходимым для описания энергобаланса процесса СГП.

Рассмотрим вклад УВ газообразных продуктов детонации в реализацию СГП частиц. Скорость детонации используемого для метания взрывчатого вещества $D = 6$ км/с, а время распространения ударной волны $10^{-5} - 10^{-6}$ с. При разлете со свободной поверхности продукты детонации дополнительно увеличивают скорость $W = D + D'$. Скорость метания частиц 1–3 км/с, при этом время подхода потока частиц к преграде зарегистрировано экспериментально и составляет 10–12 мкс и более. Происходит обгон продуктами детонации летящих частиц и опережающее взаимодействие ПД с материалом преграды (давление УВ продуктов детонации ~1 ГПа и более).

Теоретическое исследование процесса сверхглубокого проникновения частиц (СГП) выявило как одну из основных роль ударной волны в процессе внедрения частиц в преграду. Фактически процесс СГП представляет собой ударное воздействие частиц, наложенное на воздействие продуктов детонации на металлическую заготовку.

При воздействии на материал преграды ПД ударная волна несет импульс энергии $E_{УВ}$, тем самым прибавляя к имеющейся энергии кристаллической решетки заготовки E_O дополнительный импульс $E_{УВ}$ и получая суммарное напряжение решетки $E_{НАП}$. При этом в момент воздействия ПД на кристаллическую решетку общая энергия $E_{НАП} = E_O + E_{УВ}$. Тем самым $E_{УВ}$ для кристаллической решетки становится источником увеличения тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, частичной пластификацией решетки, что приводит к ослаблению энергетических связей между атомами, приближаясь к значению энергии разрушения заготовки $E_{РАЗР}$.

Величина суммарной энергии $E_{НАП}$ есть значение, к которому добавляется энергетическое воздействие твердых метаемых частиц. Происходит превышение $E_{РАЗР}$ кристаллической решетки заготовки и внедрение частиц в соответствии с эффектом СГП частиц (рис. 5).

При внедрении частиц в преграду энергия частиц E_q представляет собой кинетическую инерционную энергию атомной массы вещества частицы E_{II} за вычетом реакции E_p на пограничный слой канала (аналог внутреннего трения):

$$E_q = E_{II} - E_p.$$

Глубина проникания частицы зависит от ее общей атомарной массы. Торможение частицы и образование канала происходят, пока инерционный вектор кинетической энергии частицы не станет меньше энергии решетки заготовки. Т. е. в целом сверхбольшая глубина проникания обеспечивается энергией внедрения частицы на глубину $H_{ВНЕД}$. На участке $H_{ЗАГ} - H_{ВНЕД}$, где частицы не проникают, среда остается практически невозмущенной воздействием частицы (упругое столкновение) – это явление моментального затухания колебаний атомарной решетки (рис. 6).

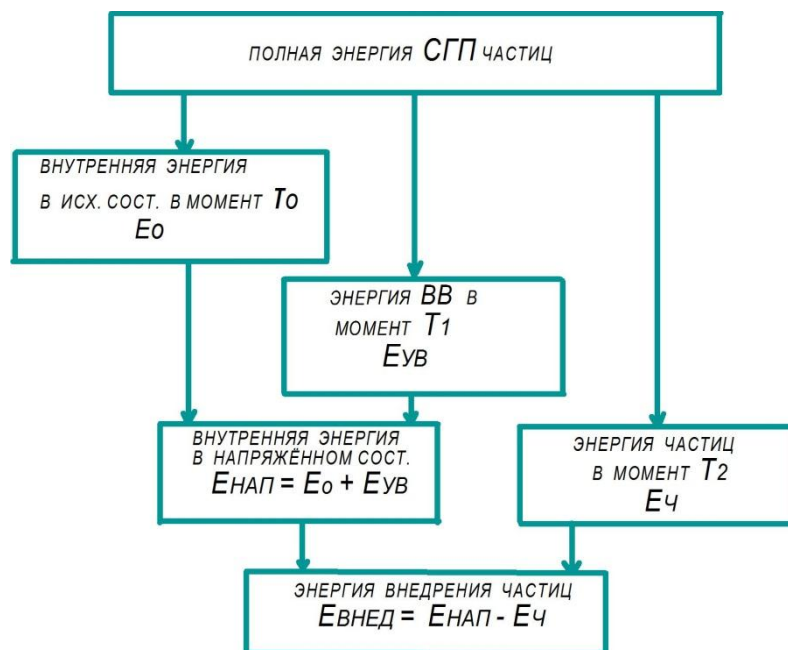


Рис. 5. Алгоритм энергетического баланса при СПП частиц

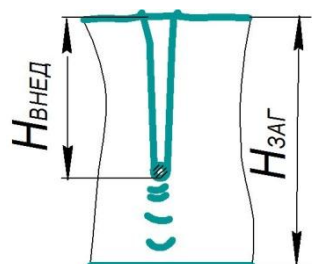


Рис. 6. Схема внедрения частиц в преграду

Кратко основной механизм СПП – это предварительное напряжение УВ продуктов детонации атомных связей кристаллической решетки преграды, приближая к уровню предельной прочности самой решетки, и при внедрении подошедших частиц имеем облегченный разрыв межмолекулярных и межатомных связей.

При этом для сверхглубокого проникания необходим разрыв только части межатомных связей на площади взаимодействия ударника с преградой Δ по осевой канала, а по окружности канала материал деформируется и сминается (рис. 7).

Исследование состояния частиц в интервале скоростей 2–8 км/с (см. рис. 3) может дать возможное обоснование размерных границ микроударников при СПП частиц. Так, размеры проникающих частиц объясняются ударными процессами взаимодействия с преградой (табл. 3).

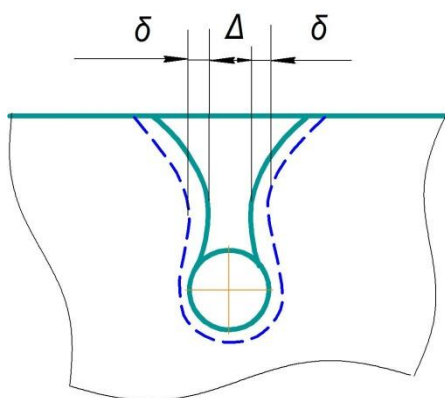


Рис. 7. Зоны деформации и разрушения кристаллической решетки преграды при СГП

Таблица 3

Ударное взаимодействие частиц разных размеров

Ориентировочный размер частицы	Области протекания явлений
До 1-10 мкм	Возможное плавление или испарение (сгорание) частицы при ударе о преграду.
~ 10 – 100 мкм	Сохранение целостности частицы. Имеет место пластическая деформация частицы. Возможен переход материала частицы в жидкое состояние.
Более ~100 мкм (или сотен мкм)	Дробление частицы. Возможно проникание отдельных фрагментов частицы с необходимой пробивной энергией и вектором.

Также оценка глубины разогрева частиц в ПД подтверждает обоснование размерного интервала частиц. Время взаимодействия ударника с преградой зависит от скорости метания. При скоростях протекания СГП время взаимодействия частицы с преградой находится в интервале $10^{-6} - 10^{-8}$ с. Определим глубину прогрева материала метаемой частицы за время t [7] при импульсном энергетическом воздействии на материал $x = \sqrt{at}$, где a – температуропроводность (для стали $a = 0,1 \text{ см}^2/\text{с}$). Размер частиц, которые могут прогреться до жидкого и возможно газообразного состояния, находится в интервале менее 10 мкм (наиболее вероятно – до 1 мкм). В этом случае СГП не может протекать.

Возможны резонансные явления при СГП частиц (рис. 8). При воздействии УВ в преграде возникает переменное поле давлений. Имеются периодические зоны сжатия и разрежения из-за упругих столкновений (пружинно-кинетического характера). При ударе фронтом подошедшей волны возникающие в заготовке остаточные резонансные колебания жесткой атомарной решетки имеют быстро затухающие свойства и способны фазово влиять на внедрение отдельных ударников, взаимно совпадая, накладываясь и усиливаясь или взаимноослабляясь. В сравнении с приведенными расчетными величинами сил возникшие величины резонансных напряжений незначительны и заносятся в зону погрешности влияний.

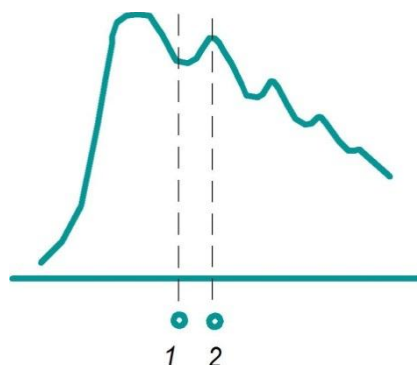


Рис. 8. Взаимодействие частиц 1 и 2 с волновым полем в преграде

Из проведенных выше исследований можно сделать вывод, что вероятнее всего скоростной интервал 1–3 км/с, который обеспечивает соответствующие давления соударения, может быть значительно повышен. Верхняя скоростная граница выявлена по взаимодействию порошков в основном технически чистых металлов, и затем перенесена на все порошковые материалы. Данные материалы не обладают высокой прочностью, поэтому при скоростях выше 3 км/с возможно их испарение или дробление до состояния невозможности проникать разрушенным фрагментам ввиду их малости, общей разноректорной кинетической энергии (в отличие от единого мощного вектора кинетической энергии целой частицы) и выброса в обратном метанию направлении.

Следовательно, по-видимому, метание высокопрочных частиц корунда, алмаза и т. п. материалов может проводиться с более высокими скоростями и энергиями. В результате получим максимально большие глубины проникания в заготовку металлов и сплавов.

Основные выводы по работе:

1. Проведен анализ влияния параметров соударения с определением роли удельной энергии высокоскоростных ударников.
2. Определен принцип, выявляющий возможность сверхглубокого проникания частиц как эффекта перехода поверхностного площадного разрушения в сверхглубокое туннельное проникание приблизительно того же объема.
3. Показана роль УВ продуктов детонации как фактор предварительного напряжения кристаллической решетки для последующего более свободного внедрения частиц.
4. Определена структура энергетического баланса при СГП.
5. Показано, что механизм сверхглубокого проникновения осуществляется за счет разрыва межмолекулярных и межатомных связей при внедрении частиц.
6. Обоснован размерный интервал проникающих частиц при СГП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушеренко С.М., Дыбов О.А., Коваль О.И. Рассмотрение результатов по сверхглубокому прониканию частиц в металлические преграды // Инж.-физ. журнал. – 2002. – Т. 75, № 2. – С. 191-195.
2. Андилевко С.А., Дыбов О.А., Роман О.В. Осесимметричный взрывной ускоритель с конической выемкой, заполненной порошком // Инж.-физ. журнал. – 2000. – Т. 73, № 4. – С. 797-801.
3. Aleksentseva S.E., Krivchenko A.L. Materials for the biomedicine, received by processing metals the high-speed stream of the discrete the particles, generated by the shock wave // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. – Kiev, Ukraine, 16-21 September, 2012. – p. 435-438.

4. Патент RU № 2 501 882 C2, МПК C22F 1/18, опубл. 20.12.2013. Способ получения наноструктурированного технически чистого титана для биомедицины. Алексенцева С.Е., Кривченко А.Л.
5. Алексенцева С.Е., Кривченко А.Л. Воздействие потока высокоскоростных дискретных частиц с различными характеристиками на металлы // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2(42). – С. 56-61.
6. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с.
7. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 239 с.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2014 г.

ABOUT THE ROLE OF ENERGY AND CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED IMPACT AND SUPERDEEP INTRODUCTION OF PARTICLES

S.E. Aleksentseva, I.V. Zaharov, A.L. Krivchenko

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

This paper analyzes the influence of impact parameters on the process of super-deep penetration of particles. The parametrical principle which reveals the possibility of super-deep penetration of particles is defined. The role of a shock wave of the detonation products as the factor of preliminary strain of crystalline lattice for the subsequent penetration of particles is shown. The algorithm of energy balance for super-deep penetration is developed. The mechanism of super-deep penetration by rupture of intermolecular and interatomic bonds during the penetration of the particles is offered. The substantiation of a dimensional interval of penetrating particles for super-deep penetration is made.

Keywords: *Shock waves, destruction of internuclear communications, model of superdeep introduction, stream of high-speed discrete particles.*

*Svetlana E. Aleksentseva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Igor V. Zaharov, Leading Engineer.
Alexander L. Krivchenko (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*