

03;05

Фазовые превращения в медной кумулятивной струе при внедрении в карбид кремния

© Б.В. Румянцев, В.Ю. Клименко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург
Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, НПП „Высокие давления“, Москва
E-mail: brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 июня 2011 г.

Экспериментально и численно исследуется внедрение кумулятивной струи в карбид кремния. В отличие от высокопрочных и более плотных металлов внедрение кумулятивной струи в керамику имеет аномальный характер и меньшую глубину пробития. Анализ экспериментальных и численных результатов показывает, что внедрение в керамические материалы осложняется радиальным взаимодействием фрагментов стенок каверны с потоком элементов струи, которое приводит к частичному плавлению и испарению элементов струи. Появление „газовой“ фазы способствует диспергированию элементов, смещению с фрагментами стенок каверны, созданию внутреннего объема поглощения и дестабилизации последующего потока струи. В результате значительная часть кумулятивной струи теряет способность к проникновению.

При исследовании кинетики высокоскоростного внедрения кумулятивной струи (КС) в хрупкие материалы были обнаружены особенности, которые качественно воспроизводились для карбида кремния, корунда, стекла и ситалла [1]. Так, на рис. 1 представлены экспериментальные времена (t) внедрения на глубину (L) кумулятивной струи длиной 60 mm на момент $t = 0$ с линейным градиентом скорости от 6.5 до 1.1 km/s в карбид кремния (плотность 30 g/cm^3 и твердость по Викерсу 17 GPa) и в сталь СТ40 (плотность 7.8 g/cm^3 и твердость по Бринеллю 2.4 GPa). Там же отображены траектории внедрения, построенные в гидродинамическом приближении с учетом прочности преграды [1,2].

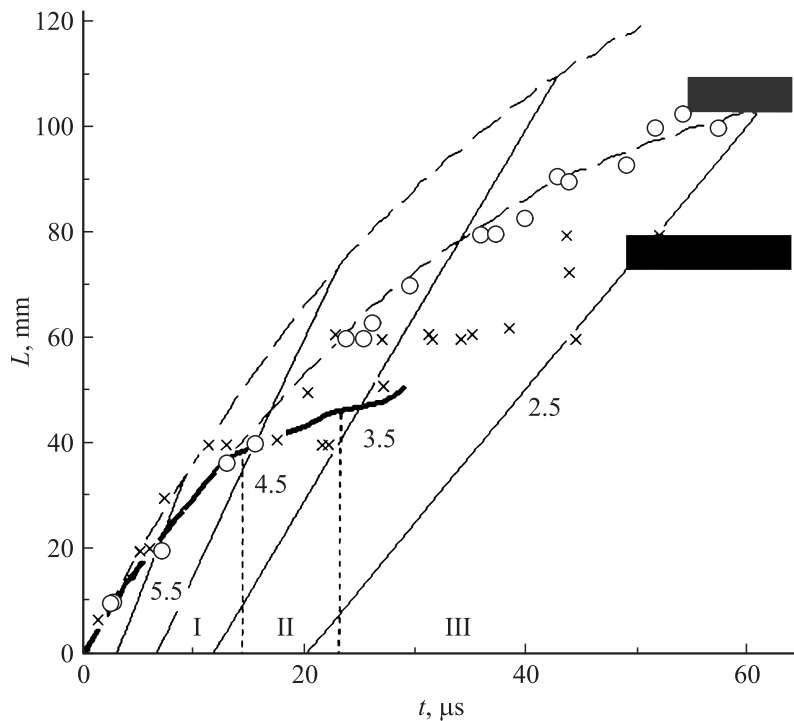


Рис. 1. Сравнение экспериментальных времен внедрения кумулятивной струи в сталь СТ40 (○) и карбид кремния (x) с расчетом в гидродинамическом приближении (штриховые кривые) и численным расчетом (сплошная кривая) внедрения в карбид кремния. Прямые линии — сетка траектории движения элементов кумулятивной струи со значением скорости в km/s. Конечные глубины пробития стали и карбида кремния отмечены темными прямоугольниками. Обозначены области: гидродинамического внедрения (I), замедления (II) и возобновления внедрения (III).

В отличие от гидродинамического струйного приближения, аномальный характер проникновения КС в хрупкие материалы проявляется в следующем (рис. 1):

— в нарушении последовательного (гидродинамического) вида внедрения вплоть до временной приостановки;

- в возобновлении внедрения в неустойчивой форме;
- в уменьшении глубины пробития до 75 mm относительно более плотных материалов, например, для стали СТ40 — 106 mm от аналогичного кумулятивного заряда.

В работе [1] выдвинуто предположение, что последовательный характер внедрения в керамику осложняется радиальным взаимодействием каверны и кумулятивной струи. В результате процесс внедрения приобретает скачкообразный (аномальный) характер, являющийся следствием вторичного внедрения на схлопнувшемся материале каверны. Необходимым условием для проявления радиального взаимодействия являются высокая прочность и скорость разрушения хрупкого материала.

Для уточнения физической картины действия кумулятивной струи на хрупкий материал в данной работе анализируются результаты численного моделирования внедрения кумулятивной струи в карбид кремния. Численное моделирование процесса проводилось с использованием 2-мерного эйлеровского гидрокда RUSS-2DE [3]. Для расчета меди применялась модель Johnson-Cook и Steinberg-Guinan [4]. Для карбида кремния была применена модель Johnson-Holmquist Brittle Damage Model [5], которая наиболее широко используется при моделировании ударно-волновых процессов. Постановка задачи аналогична условиям эксперимента [1,6].

Анализ результатов численного моделирования показывает:

1. Начальное гидродинамическое внедрение нарушается из-за радиального воздействия каверны на проходящие элементы КС. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования внедрения кумулятивной струи в керамическую преграду, состоящую из слоев толщиной 10 mm, на моменты времени 1, 8, 15, 22 и 29 μ s. Приведены траектории движения элементов кумулятивной струи с указанными скоростями в km/s. Постоянство скорости движения элемента позволяет проследить за элементом на различных изображениях. Видно, что внедрение КС образует каверну, инициирует разрушение и схождение со скоростью 0.3–0.4 km/s фрагментов стенок каверны радиально на поток струи. Область воздействия на струю увеличивается со временем. Головная часть КС, не затронутая воздействием стенок каверны, внедряется в гидродинамическом режиме, который заканчивается к 13 μ s (см. 1 рис. 2).

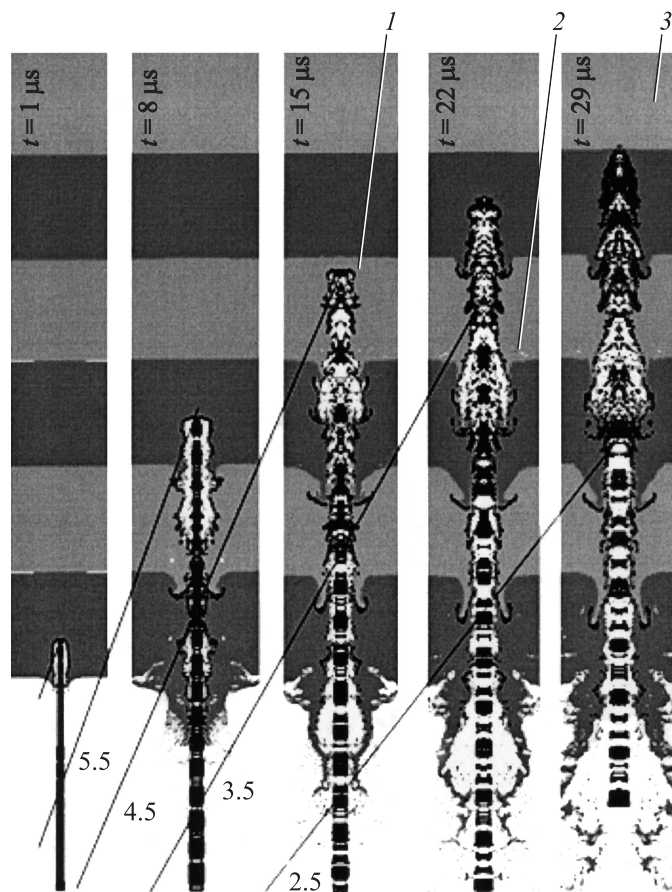


Рис. 2. Отображение численных результатов моделирования внедрения кумулятивной струи в преграду из пластин карбида кремния $10 \times 80 \times 80$ mm на моменты времени 1, 8, 15, 22 и $29 \mu\text{s}$. Наклонные прямые — траектории элементов струи с обозначением скорости движения в km/s. 1 — окончание гидродинамического внедрения, 2 — область диспергирования элементов, 3 — накопление элементов на дне каверны.

Прорыв последующего потока элементов через область воздействия стенок каверны приводит к локальному расширению каверны 2, что является следствием плавления и частичного испарения меди

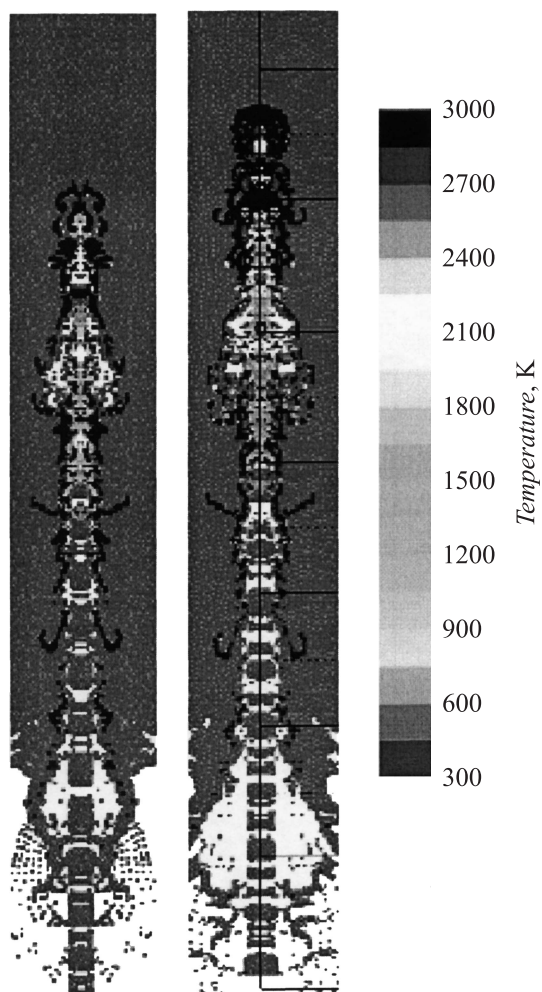


Рис. 3. Результаты численного расчета распределения температуры в кумулятивной струе при внедрении в карбид кремния на моменты времени 17 и 25 μs . Справа приведена шкала значений температуры.

при высокоскоростном взаимодействии с керамикой. Из рис. 3, где приведено распределение температуры в меди на моменты времени 17 и 25 μs , видно, что торможение меди на дне каверны и в области действия стенок каверны приводит к разогреву свыше 3000 К и появлению „газовой“ фазы с плотностью меньше конденсированной меди. При выходе элемента из области воздействия в область каверны выше по потоку происходят разгрузка и диспергирование элемента, перемешивание с фрагментами разрушенной керамики, конденсация с выделением энергии. Таким образом, часть кинетической энергии элемента переводится в объем и способствует расширению каверны. Сам элемент при продавливании через область действия каверны теряет часть массы, при выходе в область расширения деформируется, разрушается и частично расходуется при прохождении пыле-,газовой“ массы, заполняющей локальный объем расширения каверны 2.

3. Прошедшие через области взаимодействия элементы КС теряют способность к проникновению и скапливаются в области внедрения 3 на рис. 2. Конкурирующие процессы разрушения керамики в волнах разгрузки и поступления потока хвостовых элементов КС определяют окончание внедрения.

Результаты численного расчета траектории внедрения представлены на рис. 1 и качественно отражают три стадии внедрения КС в хрупкие материалы: гидродинамический участок I, замедление внедрения II, и возобновление в неэффективном виде III, что согласуется с экспериментальными результатами [1]. Отличия связаны с конкретной постановкой эксперимента — применение реального кумулятивного заряда и преграды из слоев керамики с расположением контактных датчиков между слоями. Поэтому измерения на гидродинамическом участке отражают меньшую прочность керамики, а разрыв кумулятивной струи на отдельные элементы с радиальным расхождением в совокупности с воздействием каверны определяет большой разброс экспериментальных времен внедрения на конечной стадии.

Возможность плавления и частичного испарения меди определяется большой кинетической энергией элемента струи, которая при торможении на дне каверны и на боковой стенке переходит в тепловую. Преобразование происходит через сжатие в ударной волне, образующейся в области торможения на границе со сжимаемой средой, и при дальнейшей разгрузке в область двухфазного состояния жидкость–пар [7].

Тепловые свойства меди

Температура, °С		Теплота, MJ/kg		Теплоемкость, KJ/(kg · К)
плавления	испарения	плавления	испарения	
1083	2877	0.206	4.82	0.389

Как следует из тепловых параметров меди, приведенных в таблице, минимальная удельная кинетическая энергия, необходимая для плавления и нагрева до 3000 К, равна примерно 1.4 MJ/kg, что соответствует скоростям струи более 4 km/s при внедрении в карбид кремния.

Об аналогичном испарении элементов КС при внедрении в стекло свидетельствуют результаты работы [8], где был сохранен и исследован материал „red glass“, заполняющий каверну и состоящий из смеси медных частиц от 2 mm до сфер микронного размера и пористой массы стекла, содержащей до 5% меди. Пористость стеклянной массы и наличие мелких медных сфер авторы объясняют конденсацией паров меди.

В экспериментах [1] не было предусмотрено сохранение содержимого каверны в тыльных слоях стали после пробитой керамик, но было замечено присутствие вспененной меди и отсутствие песта в остаточной каверне.

Аномальный характер внедрения кумулятивной струи в хрупкие материалы отражает радиальное действие разрушенного при начальном внедрении материала преграды на движение последующего потока элементов КС. Взаимодействие элементов КС со скоростями более 4 km/s с материалом каверны приводит к плавлению, частичному испарению материала струи на дне каверны и в области радиального действия стенок каверны. При выходе из области взаимодействия элементы диспергируются, смешиваются с фрагментами материала каверны. Деформирование элементов КС снижает их дальнейшую эффективность по увеличению глубины каверны и способствует накоплению материала струи на дне каверны. В совокупности это приводит к сокращению глубины пробития хрупких материалов. Влияние волн разгрузки на многократное взаимодействие струи и каверны определяет степень проявления аномального внедрения КС в хрупкие материалы.

Список литературы

- [1] Румянцев Б.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 6. С. 28.
- [2] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Изд. 2-е. Т. 2. Гл. 17. С. 238.
- [3] Romanov G.S., Suvorov A.E., Kozlov I.M., Klimenko V.Yu. // Proceedings of International Conference on New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Media. Oxford, UK, 1997. P. 410.
- [4] Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. P. 1498.
- [5] Holmquist T.J., Johnson G.R. // J. Appl. Phys. 2002. V. 9. P. 5858.
- [6] Румянцев Б.В., Клименко В.Ю. // Proceedings International Conference „Shock Waves in Condensed Matter“. Saint-Petersburg–Novgorod, Russia, 2010. P. 210.