

Механизмы проявления прочности при высокоскоростном внедрении металлических струй в металлы и хрупкие материалы

© Б.В. Румянцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: brum@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 21 февраля 2011 г.
В окончательной редакции 4 апреля 2011 г.)

На основе исследований кинетики внедрения анализируются механизмы проявления прочности при проникании кумулятивных струй в металлы и хрупкие материалы. В отличие от внедрения в металлы, идущего с плавным изменением скорости, процесс проникания кумулятивной струи в хрупкий материал носит прерывистый характер: начальное стационарное внедрение прекращается и возобновляется через некоторое время в неустойчивой форме. Выявленные особенности объясняются с позиций радиального воздействия каверны в хрупком материале на кумулятивную струю, когда первичное внедрение струи вызывает радиальное схождение фрагментов стенок каверны и вторичное проникание через области взаимодействия. Необходимыми условием для радиального воздействия являются большое прочностное сопротивление и высокая скорость разрушения хрупких материалов, обеспечивающие разрушение и схождение стенок каверны. Схлопывание каверны, а также вторичное проникание прекращается с приходом волны разгрузки в зону первичного внедрения.

Высокоскоростное внедрение металлических струй, связанное с практикой применения кумулятивных зарядов, в основном исследовано для металлов. В соответствии с гидродинамической теорией [1–3] увеличение прочности стали предсказуемо приводило к уменьшению проникания. Но только исследование кинетики внедрения позволило выяснить неоднозначный характер влияния прочности. На рис. 1 приведены результаты определения траектории внедрения медной струи в металлическую преграду. При детонации кумулятивного заряда 1, характеристики которого приведены в [4], формировалась медная струя 2 длиной 55 мм (на момент начала ее внедрения) с линейным градиентом скоростей от 6.5 км/с в начале до 1.1 км/с в конце. Времена внедрения (точки I) в металлическую преграду 3 измерялись с помощью контактных датчиков.

Эксперимент хорошо описывается гидродинамическим приближением (ГД-приближение) (кривая II на рис. 1), основанным на интегрировании уравнений внедрения жидкой струи,

$$dL = dl / (V_j / U - 1), \quad (1)$$

$$dt = dL / U, \quad (2)$$

где dL — прирост глубины от внедрения элемента кумулятивной струи (КС) длиной dl за время внедрения dt .

Для определения скорости внедрения U элемента КС, летящего со скоростью V_j (траектории движения III), с учетом динамического сопротивления деформированию материалов струи и преграды применялось модифицированное уравнение Бернулли [2,3]

$$R_t + \rho_t U^2 / 2 = R_j + \rho_j (V_j - U)^2 / 2, \quad (3)$$

где ρ_j, R_j и ρ_t, R_t — плотность и динамическое сопротивление материалов струи (индекс j) и преграды

(индекс t) соответственно. Значения ρ_j, R_j для медной струи принимались равными 8900 кг/м³ и 0.45 ГПа. Динамическое сопротивление материала преграды находилось из описания экспериментальных результатов на квазистационарном участке II внедрения сплошной части струи. Параметры исследованных материалов приведены в таблице.

Из рис. 1 видно следующее.

1) Внедрение в металлы имеет последовательный характер, расчет согласуется с экспериментом до самого окончания внедрения.

2) Динамическое сопротивление внедрению практически совпадает со статической твердостью металла по Бринеллю H_B .

3) Скорость окончания внедрения (траектория IV на рис. 1) может быть определена из условия, что кинетическая энергия элемента струи $0.5\pi\rho_j(r_j V_j)^2 dl$ расходуется на вытеснение материала преграды из каверны глубиной dL и радиусом r_t . Тогда радиус каверны определяется из уравнений (1) и (3)

$$r_t = r_j V_j (2A_t / \rho_j [m / (1 - (1 - m/n)^{0.5}) - 1])^{-0.5} \quad (4)$$

где $m = 1 - \rho_t / \rho_j$, $n = 1 - 2(R_t - R_j) / (\rho_j V_j^2)$, A_t — работа деформирования материала преграды, r_t, r_j — радиусы каверны и струи.

Работа деформирования пропорциональна прочности материала и для металлов наблюдается $A_t \sim 2H_B$ [5]. Скорость окончания внедрения превышает скорость торможения при $U = 0$ в уравнении (1) и соответствует нарушению гидродинамического характера течения, т. е. является критической V_{cr} при $r_t / r_j = 2$. Условие критической скорости ограничивает применение уравнения Бернулли (3) при малых скоростях внедрения [3].

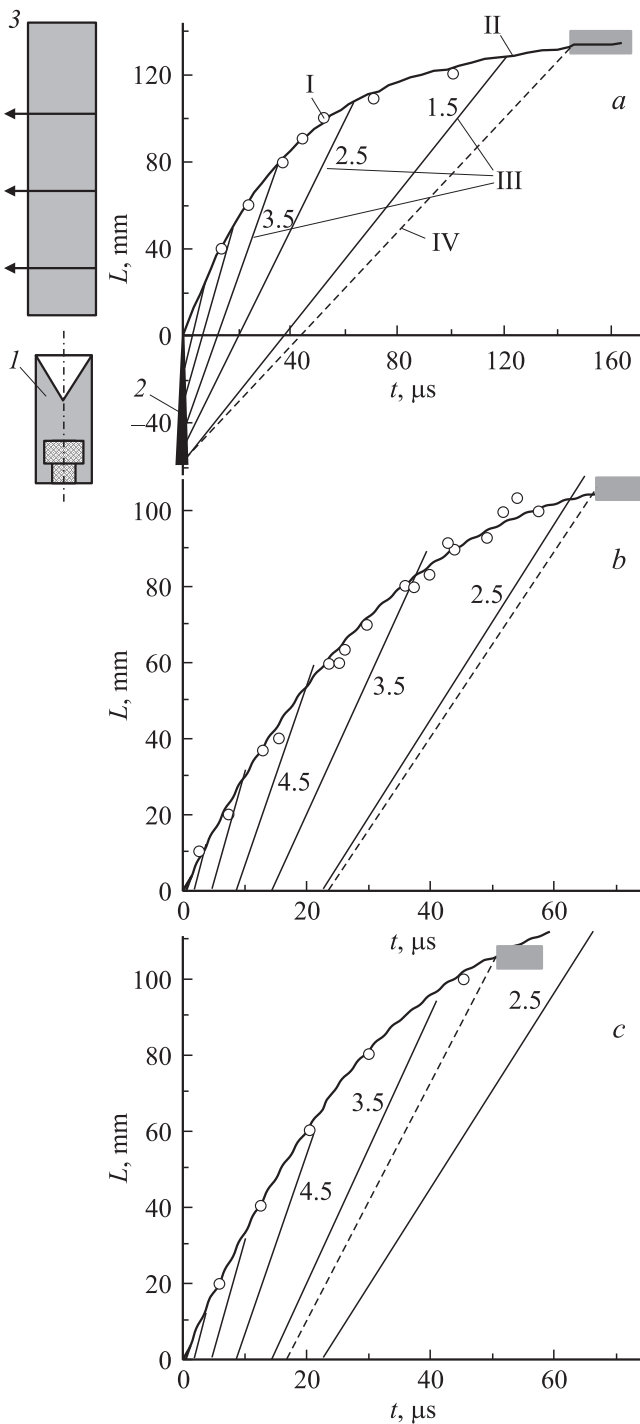


Рис. 1. Внедрение медной струи в медь М1 (а), сталь СТ40 (b), титан ВТ6 (с). Экспериментальные времена внедрения кумулятивной струи (КС) (I) и расчетные траектории: II — траектория внедрения КС в ГД-приближении, III — сетка траекторий движения элементов КС с пошаговым обозначением скорости движения (в km/s) (для головных элементов обозначение скорости отсутствует). Траектория IV появляется в тексте. Серая область — конечная глубина пробития. 1 — кумулятивный заряд, 2 — положение кумулятивной струи на момент начала внедрения, 3 — преграда, стрелки показывают размещение контактных датчиков.

4) Примерно 10–15% „хвостовых“ элементов, обладающих пробивной способностью, не участвуют в увеличении глубины пробития (серая область на рис. 1), оседая на стенках каверны и не доходя до дна. Это отражает специфику работы конкретного кумулятивного заряда. Кумулятивная струя образуется с градиентом скоростей, растягивается и разрывается на отдельные элементы при движении до дна каверны. После разрыва элементы в своем движении проявляют радиальную составляющую скорости на уровне 40–50 м/с. При отклонениях струи, сравнимых с радиусом каверны, часть элемента „намазывается“ на стенку и исключается из пробития. Такое опосредованное влияние прочности преграды не нарушает последовательный характер внедрения.

Таким образом, прочность металла оказывает влияние на пробитие через динамическое сопротивление прониканию в модифицированном уравнении Бернулли (3) и через критическую скорость проникания, обеспечивающую вытеснение материала преграды в объеме, достаточном для сохранения гидродинамического характера течения струи.

Из уравнения (4) видно, что при определенной прочности относительно легкие материалы будут иметь большую критическую скорость, что изначально обосновывало применение титановых сплавов и высокотвердых керамик при защите от пуль, осколков и кумулятивной струи.

При исследовании кинетики внедрения КС в хрупкие материалы (ХМ) (рис. 2) было обнаружено [4], что экспериментальные значения времен (точки I) начиная с некоторого момента отклоняются от ГД-приближения (кривая II на рис. 2) в сторону больших времен внедрения. Формально это должно отражать увеличение сопротивления проникания. Более того, на уровне 40–60 мм наблюдается временное прекращение внедрения и дальнейшее его возобновление в нестабильной форме с разбросом экспериментальных времен. Окончание внедрения КС определялось по отсутствию пробития металла после слоя ХМ. Конечная глубина внедрения в ХМ (серая область на рис. 2) меньше глубины проникания в стальную преграду (106 мм), что подтверждает эффективность ХМ при поглощении КС.

Указанные особенности могут быть объяснены с позиций радиального воздействия каверны в хрупком материале на КС. Возможность радиального воздействия обусловлена относительно малым соотношением радиусов струи и каверны в ХМ и схождением стенок каверны. При разгрузке ХМ из зоны внедрения в объем каверны (процесс I на рис. 3) вследствие высокой скорости разрушения формируются откольные фрагменты,двигающиеся к оси 2. Схлопывание каверны происходит за время t_{in} (рис. 2, a) и отсекает головную часть струи, которая обеспечивает начальное первичное внедрение (кривая IV на рис. 2). Момент излома траектории свидетельствует об окончании гидродинамического характера внедрения головной части КС. При продолжающемся поступлении элементов КС происходит

Характеристики материалов и экспериментальные результаты внедрения кумулятивной струи

Наименование материала (размер пластин, mm)	Плотность, 10^{-3} kg/m^3	Твердость $H_B (H_V)$, GPa	Критическая скорость V_{cr}^* , km/s	Экспериментальные параметры		
				Динамическое сопро- тивление R_t , GPa	Окончание внедрения	
					Глубина, mm	Скорость, km/s
Медь М1 ($\phi = 60, h = 20$)	8.9	0.45	1.3	0.6	135	1.3
Сталь СТ40 ($\phi = 60, h = 20$)	7.8	2.4	2.2	2.4	106	2.4
Титан ВТ6 ($50 \times 50 \times 20$)	4.5	3.3	3.0	3.3	105	2.9
Карбид кремния ($80 \times 80 \times 20$)	3.0	(17)	—	5	70	>3.8
Корунд ($100 \times 100 \times 10$)	3.8	(19)	—	7	82	>3.6
Силикатное стекло ($80 \times 80 \times 10$)	2.5	(5.5)	—	5	96	>3.3
Ситалл ($80 \times 80 \times (24-32)$)	2.45	(8.4)	—	6	96	>3.2

Примечание. * Рассчитана по уравнению (4) при $r_t/r_j = 2$.

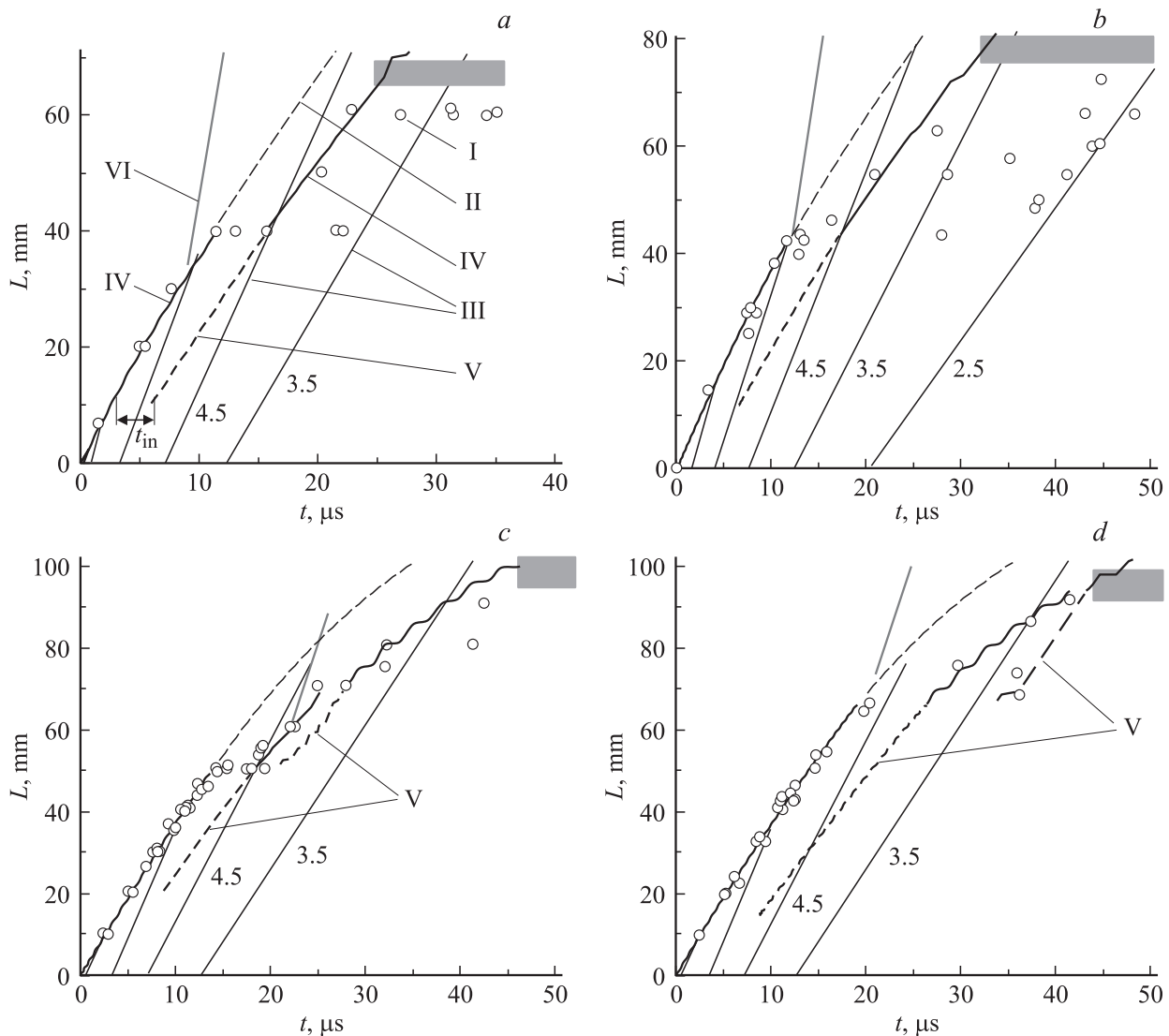


Рис. 2. Внедрение медной струи в карбид кремния (а), корунд (b), стекло (с), ситалл (d). I–III — то же, что на рис. 1. Расчетные траектории: IV — первичного внедрения; V — вторичного внедрения; VI — движения боковой волны разгрузки по оси внедрения.

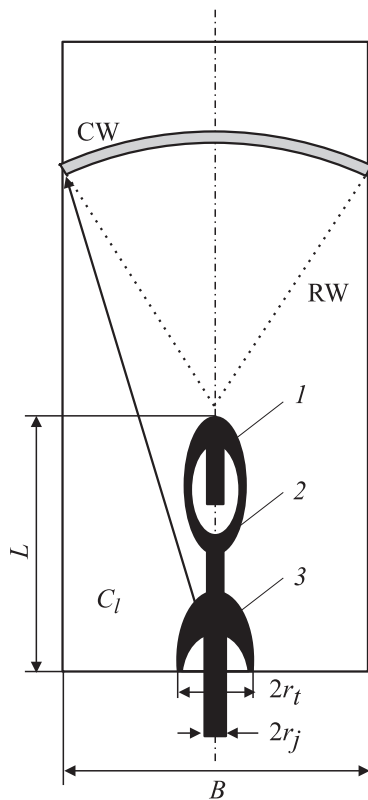


Рис. 3. Схема внедрения и волновая картина в преграде на момент опережения внедрения КС боковой волной разгрузки. 1 — первичное внедрение, 2 — схождение (схлопывание) стенок каверны, 3 — вторичное проникание. CW — волна сжатия от момента начала внедрения, RW — сходящаяся к оси боковая волна разгрузки, C_l — продольная скорость звука, B — поперечный размер преграды из ХМ, L — глубина внедрения на момент опережения боковой волной разгрузки.

вторичное проникание через схлопнувшийся материал каверны (процесс 3 на рис. 3). Вторичное проникание начинается на глубине опережения фронта разрушения от свободной лицевой поверхности и продолжается по всей глубине каверны первичного внедрения IV головной части КС, т.е. до временной „остановки“ внедрения. Расчет вторичного внедрения в ГД-приближении по схлопнувшемуся материалу при условии отсутствия прочности показан кривой V на рис. 2. При выходе вторичного проникания в непробитый материал восстанавливается первичное внедрение (кривая IV на рис. 2), и процесс может повторяться до окончания поступления элементов КС.

При ограниченных размерах пластин ХМ проявляется влияние боковых волн разгрузки. От момента начала внедрения по хрупкому материалу с продольной скоростью звука C_l проходит волна сжатия CW (рис. 3). При превышении в ней предела текучести и с приходом боковой волны разгрузки RW хрупкий материал разрушается. На рис. 2 приведена траектория VI выхода боковой волны разгрузки RW на ось после опережения внедрения. После прихода волны разгрузки первичное

внедрение идет в разрушенный материал, и условий для радиального схлопывания нет.

При определенном соотношении скорости разгрузки и поперечного размера преграды, как в случае стекла, ситалла, может наблюдаться периодический характер схлопывания.

Начальная (гидродинамическая) стадия внедрения осуществляется струей, не затронутой радиальным действием каверны, начинающимся с задержкой. Траектория внедрения II на этой стадии описывается в ГД-приближении. Динамическое сопротивление преграды на этом участке (см. таблицу) совпадает со статическим определением микротвердости для литевых материалов (стекло и ситалл) и значительно меньше для поликристаллических материалов (карбид кремния и корунд). Это объясняется, по-видимому, различным масштабом при определении микротвердости и воздействии струи по отношению к размеру зерна структуры. Совпадение динамической и статической прочностных характеристик для литевых ХМ на гидродинамическом участке не подтверждает возможность разрушения в области сжатия впереди зоны внедрения [3]. Разрушение с потерей прочности развивается только в областях, где боковая волна разгрузки опережает внедрение.

Положение излома траектории внедрения определяется временем задержки t_{in} радиального действия фрагментов каверны на струю, которое в свою очередь зависит от скорости схождения и радиуса каверны. Более высокотвердые ХМ показывают меньшее время задержки t_{in} и более короткий гидродинамический участок внедрения от 35–40 мм для карбида кремния до 60–70 мм для ситалла. Длительность кажущейся остановки внедрения зависит от поперечных размеров изделия из ХМ.

Обращает на себя внимание большой разброс экспериментальных значений времен внедрения после его остановки. Это свидетельствует о значительной дестабилизации осевого движения фрагментов струи после радиального воздействия. Расчет в ГД-приближении с учетом вторичного внедрения дает минимально возможные времена, так как, естественно, не учитывает возмущающего радиального действия и ограничивает область разброса слева, т.е. описывает максимальный результат проникания. Регистрируемые большие времена на заключительной стадии проникания отражают снижение доли хвостовых элементов, участвующих в пробитии в осевом направлении, и увеличение пробития в радиальном направлении.

Определение скорости струи в конце внедрения для ХМ теряет смысл. В то же время конечная глубина пробития хорошо воспроизводится. Экспериментально определенная глубина пробития (см. таблицу) уменьшается с увеличением твердости ХМ.

Таким образом, с позиций радиального взаимодействия кумулятивной струи и каверны рассмотрена кинетика внедрения КС в ХМ. Скачкообразное внедрение отражает косвенное проявление прочностного сопротивления ХМ через схлопывание стенок каверны и прекращается при воздействии волны разгрузки.

Наряду с уже отмеченным механизмом влияния прочности в случае внедрения в металлы вторичная радиальная реакция ХМ приводит к повышенному расходу КС и существенно дестабилизирует процесс высокоскоростного проникания металлических струй.

Список литературы

- [1] М.А. Лаврентьев. Успехи мат. наук **12**, 4 (76), 41 (1957).
- [2] В.П. Алексеевский. Физика горения и взрыва **2**, 2, 99 (1966).
- [3] В.Б. Лазарев, А.С. Баланкин, А.Д. Изотов, А.А. Кожушко. Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов. Наука, М. (1993). 175 с.
- [4] Б.В. Румянцев. ЖТФ **79**, 6, 28 (2009).
- [5] Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина, Г.И. Мишина. Наука, М. (1974). 175 с.