

Ю. Н. Бухарев, В. А. Морозов, М. И. Хаймович,
И. Н. Шутова

КРИТЕРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОНИКАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ДЛИННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СОУДАРЕНИИ С ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ПРЕГРАДОЙ

Работа посвящена уточнению критериев моделирования проникающего действия длинных стержней при высокоскоростном ударе путем замены материалов ударника и преграды на более мягкие и проведения экспериментов на меньшей скорости. В качестве моделирующего материала использовался пластилин, для которого в работе экспериментально получены прочностные параметры, определяющие процесс пенетрации.

При экспериментальном исследовании высокоскоростного удара возникает проблема разгона ударника, которая обычно решается путем применения дорогостоящего оборудования.

В [1] предложено моделировать проникающее действие длинных стержней при высокоскоростном соударении с плоской преградой ударом с меньшей скоростью. Для этого материалы ударника и преграды заменяются на более мягкие (т. е. с меньшим ударным импедансом). Например, в [1] одинаковый материал ударника и преграды (сталь) в модельных экспериментах заменялся на пластилин. При этом результаты испытаний переносятся на реальные условия с использованием критерия моделирования $\eta = \frac{\rho v_0^2}{Y_p}$, где ρ — плотность материала стержня и преграды; v_0 — скорость удара; Y_p — параметр прочности материала стержня.

Такое моделирование существенно упрощает эксперимент, однако имеет очевидные ограничения из-за учета взаимного влияния термодинамических и прочностных параметров соударения [2—5]. Детальный анализ уравнений Тейта [2, 4, 5], описывающих проникание длинного стержня в полубесконечную преграду в гидродинамическом приближении, показывает, что в некоторых случаях критерия η недостаточно для моделирования удара. Необходимо учитывать также соотношения между Y_p и параметром прочности преграды R_t . Данная работа посвящена уточнению критериев моделирования высокоскоростного удара и получению экспериментальных данных по параметрам Y_p и R_t , характеризующим прочностные свойства пластилинового стержня, проникающего в пластилиновую преграду.

Проникание ударника в преграду включает в себя образование кратера в последней и разрушение снаряда внутри кратера. В [2] для описания этого процесса использовано модифицированное уравнение Бернулли

$$p = \frac{1}{2} \rho_p (v - u)^2 + Y_p = \frac{1}{2} \rho_t u^2 + R_t, \quad (1)$$

где p — давление на поверхности между стержнем и преградой; u — скорость проникания; v — скорость твердой части стержня; ρ_p , ρ_t — плотность стержня и преграды; Y_p , R_t — динамические прочностные характеристики стержня и преграды.

Отсюда скорость проникания (движения границы стержень — преграда)

$$u = \frac{1}{1 - \mu^2} (v - \mu \sqrt{v^2 + A}), \quad (2)$$

$$\mu = \sqrt{\rho_t / \rho_p}, \quad A = 2 \frac{R_t - Y_p}{\rho_p} (1 - \mu^2).$$

Если $u = 0$, то критическая скорость, при которой отсутствует проникание,

$$v_c = \sqrt{\frac{2(R_t - Y_p)}{\rho_p}}. \quad (3)$$

Уравнение движения стержня в предположении, что давление, действующее на жесткий остаток стержня, не может превысить величины Y_p , имеет вид

$$Y_p = -\rho_p l \frac{dv}{dt}, \quad (4)$$

где l — текущая длина стержня; v — текущая скорость. Скорость укорочения стержня

$$\frac{dl}{dt} = u - v. \quad (5)$$

Объединяя (5) и (4), получим

$$\frac{dl}{l} - \frac{\rho_p(v-u)}{Y_p} dt. \quad (6)$$

После подстановки v из (2) уравнение (6) может быть проинтегрировано для различных соотношений R_t и Y_p . В [2] найдено, что для одинаковых материалов $R_t > Y_p$. Принимая $\rho_p = \rho_t$, для $v > v_c$ имеем

$$\frac{l_c}{L} = \left(\frac{v_c}{v_0}\right)^{\frac{R_t - Y_p}{Y_p}} \exp[-\rho_p(v_0^2 - v_c^2)/4Y_p]. \quad (7)$$

Здесь l_c — остаточная длина жесткой части стержня в момент $v = v_c$; L — начальная длина стержня; v_0 — начальная скорость стержня.

Когда величина v становится ниже критической v_c , пенетрация прекращается, и преграда может рассматриваться как жесткое тело. Интегрирование при $u = 0$ дает

$$\frac{l_s}{l_c} = \exp\left(\frac{Y_p - R_t}{Y_p}\right), \quad (8)$$

l_s — остаточная длина в момент его остановки ($v = 0$).

Объединим (8), (7) и найдем связь между конечной длиной жесткой части стержня l_s и параметрами проникания:

$$\frac{l_s}{L} = \left(\frac{v_c}{v_0}\right)^{\frac{R_t - Y_p}{Y_p}} \exp[-\rho(v_0^2 + v_c^2)/4Y_p]. \quad (9)$$

Глубина проникания h при $\rho_p = \rho_t = \rho$ определяется уравнением

$$\frac{h}{L} = \frac{1}{\xi} \left(2\bar{v}^2 x - \frac{\beta}{x}\right) x^\beta \exp[\bar{v}^2(x^2 - 1)] dx, \quad (10)$$

где $\bar{v}^2 = \frac{\rho v_0^2}{4Y_p}$; $\xi = \frac{v}{v_0}$; $\beta = \frac{R_t - Y_p}{R_t}$. В [2] приведены аналитические решения для случаев $R_t/Y_p = 1$; 3; 5.

Анализ приведенных соотношений позволяет сделать некоторые выводы относительно возможности моделирования проникающего действия при высокоскоростном ударе, а также экспериментального определения величин R_t и Y_p для конкретных материалов.

Из формул (9) и (10) видно, что при $\rho_p = \rho_t = \rho$ остаточная длина стержня и глубина проникания полностью определяются двумя безразмерными комплексами:

$$\eta = \frac{\rho v_0^2}{Y_p}, \quad \beta = \frac{R_t}{Y_p} - 1, \quad (11)$$

поэтому моделирование высокоскоростного удара по критерию η , как в [1], без проверки постоянства β некорректно. Следовательно, для реального и моделирующего материалов необходимо экспериментально определить R_t и Y_p . Соотношение $R_t/Y_p = 3$ для ударников и преград из одинаковых материалов проверено для металлов [2], для других сред (пластилин, глина) такие данные отсутствуют.

Для расчетов величин R_t и Y_p можно использовать выражение (9). Зависимость $l_s/L(v_0)$ находится из экспериментов по метанию стержней в полубесконечную преграду. Затем методом наименьших квадратов вычисляются R_t и Y_p , при которых зависимость (9) наиболее приближена к экспериментальной.

Существует несколько способов проверки полученного результата. Например, значения R_t и Y_p подставляются в (10) и расчетное конечное заглубление h сравнивается с измеренным в опыте. Затем в специально проведенных опытах можно определить v_c как скорость, при которой прекращается пенетрация. Погрешность нахождения v_c для пластилина довольно высока, так как при скоростях, близких к критической, стержень слегка продавливает преграду, и понять, при какой начальной скорости начинается пенетрация, трудно. По-видимому, можно принять, что если стержень после удара невозможно отделить от преграды без нарушения поверхности, то начальная скорость превысила критическую. Полученное значение v_c сравнивается с рассчитанным по формуле (3).

Вся описанная процедура использована при обработке результатов опытов по метанию пластилиновых стержней в пластилиновую преграду.

Эксперименты проводились на ударной баллистической установке калибром 30 мм. Рабочим газом служил воздух, закачиваемый в камеру высокого давления, отделенную от ствола тонкой металлической мембраной. Давление в камере варьировалось от 0,2 до 5,0 МПа. Выстрел производился пластилиновым стержнем, изготовленным из детского пластилина (объединение «Корунд», г. Дзержинск), с соотношением начальной длины к диаметру от 2,5 до 5,0. Для лучшего скольжения в стволе боковая поверхность стержня покрывалась одним слоем бумаги. При $p > 1$ МПа стержень перед выстрелом помещался на расстоянии ≈ 100 мм от дульного среза (общая длина ствола 1,8 м), так как при размещении в казенной части ударник расплющивался в стволе. Несколько опытов проведено с пенопластовым поддоном, который отделялся от стержня отсекающим, установленным на выходе из ствола.

Скорость стержня перед соударением определялась по времени пролета мимо двух пар светодiodов, расположенных по траектории движения со смещением на 200 мм.

Преграда готовилась из пластилина того же сорта, что и стержень, в виде цилиндра диаметром 300 и длиной 250 мм. Она устанавливалась так, чтобы плоскость торца была перпендикулярна оси ствола баллистической установки. После каждого опыта преграда заново формировалась в цилиндр.

Преграда и ударник предварительно выдерживались в течение суток при температуре 18—19 °С, которая контролировалась прибором В7-22. После окончания опыта вырезалась часть мишени с остатком стержня и проводились измерения остаточной длины l_s и глубины проникания h .

При ударе с $v_0 \leq 40$ —60 м/с стержень приобретает грибовидную форму (рис. 1) и легко отделяется от преграды, в которой остается небольшое углубление (≈ 5 мм). В случае $v_0 > 60$ м/с стержень заметно углубляется в преграду, часть материала стержня перетекает в направлении, противоположном внедрению (рис. 2). При $v_0 = 60$ —200 м/с деформация стержня сопровождается потерей массы и материал стержня осаждается на стенках каверны.

Анализ данных позволяет сделать вывод о том, что критическая скорость в случае удара пластилином по пластилину находится в диапазоне от 40 до 70 м/с.



Рис. 1.

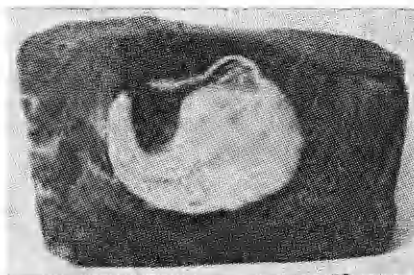


Рис. 2.

В таблице приведены результаты замеров начальной и остаточной длины l_s стержня, глубины проникания h , отношения начальной длины к диаметру L/D , начальной скорости v_0 . Заглубление определялось относительно исходной поверхности преграды. Остаточная длина измерялась от заднего торца стержня до сечения, диаметр которого увеличился относительно начального на 1 мм. При $v_0 \geq 70$ м/с значение l_s может быть определено с погрешностью ± 1 мм, так как граница между грибовидной и недеформированной частью стержня четко очерчена. При $v_0 < v_c$ граница между деформированной и остаточной частью стержня размыта и погрешность измерения l_s возрастает до $\pm 3-5$ мм.

На рис. 3 приведены значения l_s/L в зависимости от v_0 , позволяющие методом наименьших квадратов определить неизвестные параметры

Номер опыта	$\frac{L}{D}$	L , мм	v_0 , м/с	l_s , мм	d , мм	$\frac{l_s}{L}$
1	2,5	72,5	38	26	6	0,358
2	2,5	71,7	85	13	7	0,18
3	2,4	70,5	67	19	11	0,27
4	2,5	72,3	27	30	4	0,42
5	2,5	71,7	110	7	17	0,1
6	2,4	70,6	109	8	14	0,11
7	2,5	73,7	48	18	10	0,244
8	2,4	70,6	113	7	20	0,1
9	2,4	70,5	115	7	21	0,099
10	2,4	70,5	112	9	19	0,13
11	2,5	82,8	116	5	26	0,07
12	2,5	72,3	29	20	8	0,28
13	3,0	60	176	2	24	0,03
14	3,3	100	89	18	7	0,18
15	3,3	100	130	7	—	0,07
16	2,7	54	123	5	—	0,09
17	2,7	53	104	8	15	0,15
18	2,6	52	117	7	30	0,13
19	5	102	197	2,5	45	0,025
20	5	103	76	12	8	0,116
21	5	104	60	20	10	0,193
22	5	97	80	12	20	0,123
23	5	99	102	10	25	0,099
24	5	100	109	10	23	0,1
25	5	98	108	10	—	0,098
26	5	100	96	11	21	0,11
27	5	98	86	15	19	0,153
28	5	104	70	18	—	0,172

Примечание. В опытах 16—28 стержень ускорялся в поддоне.

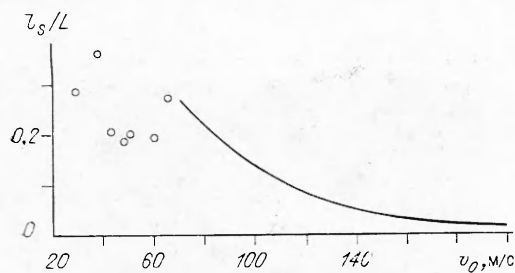


Рис. 3.

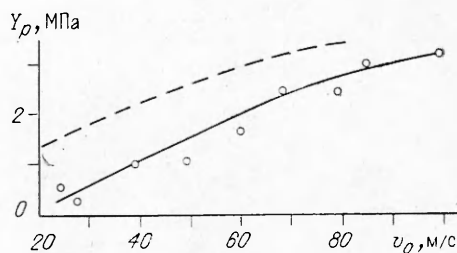


Рис. 4.

Y_p и R_t (см. соотношение (9)). В результате получено $Y_p = 3,4$ МПа, $R_t = 6,8$ МПа, $R_t/Y_p = 2,0$.

При обработке данных не использовались результаты опытов, где $v_0 < 60$ м/с (точки на рис. 3). На рис. 3 кривой показан расчет с использованием полученных значений Y_p и R_t . Видно, что результаты при $v_0 < 60$ м/с заметно отклоняются от кривой, что указывает на зависимость Y_p от v_0 . Эта зависимость, определенная с применением соотношения (8), приведена на рис. 4, где штриховой линией показана аналогичная зависимость из [1]. Видно, что кривые совпадают при скоростях, близких к критическим.

При увеличении v_0 $Y_p \rightarrow 3$ МПа, что совпадает с результатом, полученным путем обработки данных для $v_0 < v_c$. Критическая скорость, вычисленная по формуле (3), составляет 69 м/с, что также согласуется с ранее изложенными соображениями.

Эксперименты проводились со стержнями различных размеров, при этом результаты хорошо описываются единой кривой. Следовательно, представленные в работе в безразмерном виде данные характеризуют процесс внедрения.

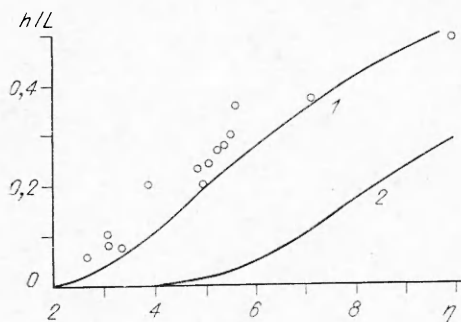


Рис. 5.

На рис. 5, 1 представлена зависимость отношения h/L от параметра η , рассчитанная по (10) при $\beta = 1$, $Y_p = 3,4$ МПа (точки — эксперимент). Хорошее совпадение расчета и эксперимента подтверждает корректность проведенной обработки результатов опытов. На рис. 5, 2 приведены результаты для случая $\beta = 2$, $Y_p = 1,1$ ГПа, полученные в [2] при соударении стержней с преградами

из стали. Отличие данных для стали и пластилина вызвано различными соотношениями R_t и Y_p для этих материалов. Отсюда следует, что моделирование только по критерию η весьма приближенное и позволяет проводить лишь качественные исследования материалов при ударе.

Таким образом, в работе экспериментально определены параметры Y_p и R_t , характеризующие прочностные свойства пластилиновых стержней при внедрении в пластилиновую преграду. Показано, что для моделирования проникающего действия длинных стержней при высокоскоростном ударе необходимо соблюдение равенства безразмерных критериев η и β . Для пластилина $\beta = 1$ (для стали $\beta = 2$ [2]), что ограничивает использование результатов опытов с пластилиновыми стержнями для анализа результатов соударения стальных стержней. При возрастании скорости удара от 20 м/с до критической (69 м/с) прочностной параметр пластилинового стержня увеличивается от 0,5 до 3,0 МПа. При $v_0 > v_c$ $Y_p = 3,4$ МПа и от скорости соударения не зависит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Johnson W., Sengupta A. K., Jhosh S. K. et al. Mechanics of high speed impact of normal incidence between plasticine long rods and plates // *J. of Mech. and Phys. of Solids.*— 1981.— 29, N 5/6.— P. 413—446.
2. Тейт А. Теория торможения длинных стержней после удара по мишени.— М.: Мир, 1968.
3. Naumann R. J. A physical basis for scaling hypervelocity impact // *Proc. 7th hypervelocity impact symp.— Florida (USA), 1964.— Vol. 4.— P. 1—33.*
4. Алексеев В. П. К вопросу о проникновении стержня в преграду с большой скоростью // *ФГВ.*— 1966.— 2, № 2.— С. 99.
5. Томашевич И. И. Проникание в преграду высокоскоростного потока удлиненных элементов // *Там же.*— 1987.— 23, № 2.— С. 97.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 14/VIII 1991

УДК 621.762 : 5.01 : 546.261

С. Н. Кульков, С. Ф. Гнусов

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ КОМПОЗИТОВ СО СТРУКТУРНОНЕУСТОЙЧИВОЙ СВЯЗКОЙ

Изучены макро- и микроструктуры твердого сплава карбид вольфрама — сталь Г13 со стабильным и метастабильным состоянием матрицы после динамического нагружения. Показано, что в результате использования структурнонеустойчивого состояния матрицы в композите удастся значительно понизить масштаб структурного уровня пластической деформации и разрушения подобных композитов не только в условиях квазистатического, но и высокоскоростного динамического нагружения.

В работе [1] показано, что использование в твердых сплавах структурнонеустойчивой связующей фазы позволяет значительно улучшить их вязкость и пластичность при сохранении уровня прочности в условиях квазистатического нагружения. Проведенные исследования позволяют выделить ряд основных моментов: формирование в материале внутренних напряжений сжатия, изменение структуры под действием внешнего нагружения, позволяющее обеспечить формоизменение в малом объеме материала, и упрочнение материала связки. Физический смысл применения структурнонеустойчивой связки в композитах состоит в понижении масштаба структурного уровня пластической деформации за счет формирования в процессе неоднородного нагружения микрокристаллической структуры связующей фазы. По-видимому, эти эффекты будут сохраняться и обеспечивать высокие механические свойства композиту в условиях динамического нагружения.

С этой целью в работе изучены макро- и микроструктуры твердого сплава WC — сталь Г13 со стабильным и метастабильным состоянием матрицы после динамического нагружения, представляющего собой удар шарового элемента с плитой из алюминиевого сплава со скоростью 1800 м/с.

В случае стабильного состояния связующей фазы ударное нагружение приводит к разрушению шарового элемента, осколки которого остаются в преграде и частично выносятся из нее. Если матрица находится в метастабильном состоянии, динамическое воздействие не приводит к нарушению сплошности материала, при этом одновременно изменяется форма метаэлемента. Анализ микроструктуры деформированных образцов (рис. 1) показывает, что в материале наблюдается большое количество микротрещин, концентрирующихся в параллельные полосы, и «треки», проходящие весь образец. Сам факт появления таких упорядоченных микротрещин в виде «треков» свидетельствует об особом состоянии структурнонеустойчивой связующей фазы. Более того, видно, что они образовались на самых ранних стадиях соударения, а только впоследствии произошел откол. По-видимому, это связано с наличием