

## СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОНИКАНИИ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ И КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

Г. Г. Савенков<sup>1</sup>, Ю. И. Мещеряков<sup>2</sup>, А. К. Диваков<sup>2</sup>, И. П. Макаревич<sup>2</sup><sup>1</sup>НИИ «Поиск», 188162 Мурино, Ленинградская обл., sav-georgij@yandex.ru<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, 199178 Санкт-Петербург

Рассматривается процесс высокоскоростного проникания удлиненных ударников и кумулятивных струй в полубесконечные преграды с начальными скоростями соударения  $2 \div 4$  км/с. При таких скоростях велик вклад механических характеристик материалов преград в конечные параметры процесса: глубину внедрения и критическую скорость ударника (струи). В качестве параметра, определяющего свойства преграды в процессе проникания, предложен порог динамической устойчивости материала на сжатие, определяемый из экспериментов по одноосному динамическому нагружению плоских мишеней.

Ключевые слова: высокоскоростное проникание, ударник, одноосное деформирование, кумулятивная струя, динамическая устойчивость.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее сложных задач механики деформируемой среды является исследование процесса проникания в прочную преграду удлиненного ударника или кумулятивной струи с начальной скоростью соударения  $2.0 \leq V_0 \leq 4.0$  км/с. Отметим, что такие скорости присущи струям кумулятивного «ножа» удлиненных кумулятивных зарядов — одного из основных средств систем разделения ракетно-космической техники (см. сборники научных трудов НПО им. С. А. Лавочкина «Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов»). Как показывают эксперименты [1], при таких скоростях необходимо учитывать кинетические потери ударника (струи), связанные с прочностью материалов преграды и струи. Сложности, обусловленные определением свойств материалов в указанном диапазоне скоростей соударения, соответствующих скоростям деформации  $\dot{\epsilon} = 10^4 \div 10^6$  с<sup>-1</sup>, делают компьютерное моделирование процесса проникания на основе численного решения уравнений механики сплошной среды не слишком эффективным с точки зрения критерия «стоимость — результат». Поэтому, хотя и с потерей точности, но более востребованными представляются аналитические модели, опирающиеся на различные модификации гидродинамической модели проникания.

Основная суть модификации модели проникания заключается во введении в уравнение Бернулли дополнительных параметров, опре-

деляющих динамические прочностные свойства материалов струи и преграды:

$$\rho_1(V_1 - V_2)^2 + 2A = \rho_2 V_2^2 + 2B, \quad (1)$$

где  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  — плотности материалов струи и преграды соответственно,  $V_1$  — скорость струи,  $V_2$  — скорость проникания (массовая скорость частиц среды непосредственно перед струей),  $A$ ,  $B$  — характеристики динамической прочности материалов струи и преграды соответственно.

Уравнение (1) носит название Алексеевского — Тейта. Существуют и другие уравнения вида (1) с дополнительными линейными членами  $(V_1 - V_2)$  и  $V_2$  в левой и правой частях этого уравнения, которые определяют вязкие свойства материалов струи и преграды [2].

Если относительно параметра  $A$  большинство авторов сходятся к отождествлению его с динамическим пределом текучести или с динамическим пределом прочности, то для  $B$  единой трактовки нет, что связано с не до конца понятным физическим смыслом этой характеристики [3]. Небольшой обзор, касающийся этой характеристики, приведен в [4]. Автор [5] предлагает рассматривать  $B$  как «диссипативное» давление, описывающее потери энергии, связанные с упругопластическим течением, сжимаемостью, нагревом преграды и т. п. В этом случае  $B$  становится обычным подгоночным параметром в уравнении (1), пригодным лишь для своего собственного определения, но никак не для оценочных расчетов глу-

бины внедрения (ведь для параметра, предлагаемого в качестве характеристики среды, необходимо предложить и способ его определения). Поэтому поиск подходящей характеристики для сопротивления среды, каковым по сути является параметр  $B$  в уравнении (1), и прояснение его физического смысла представляются актуальной задачей как с практической, так и с научной точки зрения.

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Анализ напряженно-деформированного состояния среды при высокоскоростном проникании удлиненного ударника (струи) вблизи точки стагнации (точки, разделяющей материал преграды и носовую часть ударника) показывает, что оно соответствует условиям одноосной деформации сжатия [6].

Условия строго одномерной деформации реализуются и в экспериментах по откольному отрыву материала. Образец нагружается плоской ударной волной, и при прохождении переднего фронта происходят одномерное сжатие материала и его нагрев [7], что идентично физическим процессам в случае внедрения струи в преграду. При некотором значении динамического сжатия в материале происходят необратимые структурные перестройки, вызывающие такие же необратимые изменения прочностных свойств материала. Так, достижение критических значений параметров сжатия при некоторой пороговой скорости свободной поверхности образца  $U_{inst}$  приводит к изменению характера зависимости откольной прочности от скорости удара [8]. Напряжение

$$\sigma_i = \rho_2 C_2 U_{inst} / 2 \quad (2)$$

можно назвать порогом динамической устойчивости материала на сжатие ( $C_2$  — скорость пластического фронта). Достижение материалом порога динамической устойчивости приводит, по сути, к структурному фазовому переходу и изменению прочностных свойств материала [8]. Близость физического состояния материалов и механизмов одноосного деформирования в условиях проникания струй и плоского соударения позволила выдвинуть в работе [8] идею об использовании в качестве параметра  $B$  порога динамической устойчивости на сжатие  $\sigma_i$ . В [8]  $\sigma_i$  сравнивали с динамической твердостью, которую определяли по эмпирическому соотношению, предложенному Тейтом, для четырех сплавов. В данной работе применимость

$\sigma_i$  в качестве  $B$  определялась для большого количества материалов и по другим параметрам.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по ударному нагружению материалов в условиях одноосной деформации с целью определения динамического порога устойчивости выполнены по методике, изложенной в [8], в диапазоне скоростей ударника  $V_0 = 50 \div 600$  м/с. Стандартные механические характеристики испытанных материалов приведены в табл. 1.

Продольное напряжение, соответствующее порогу динамической устойчивости, находили по выражению (2). Его значение определяли по результатам серии испытаний в диапазоне скоростей ударника, в котором выявлялся излом зависимости скорости свободной поверхности от скорости ударника. Экспериментальные значения порога устойчивости для ряда материалов представлены в табл. 2.

В случае хрупких материалов такой излом, который, как показано в [8], связан со структурной неустойчивостью материала при сжатии, получить не представлялось возможным, поскольку в условиях ударного нагружения резко меняются свойства этих материа-

Таблица 1  
Стандартные механические характеристики  
испытанных материалов

Материал	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>
12X18H10T	345	560	56	3.2
28X3СНМФА	540	745	25	9.25
38ХН3МФА	800	1 245	19	7.32
45ХНМФА	1 090	1 430	7	7.1
02Н18К9М5-ВИ	2 100	2 150	7.5	4.0
ХН75ВМЮ	890	1 225	34.5	10.8
ВТ-6	650	750	15.5	1.0
Д-16	380	520	14	—
Медь М2	180	250	58	—

Примечание.  $\sigma_{0.2}$  — предел текучести материала преграды;  $\sigma_b$  — предел прочности материала преграды;  $\delta_5$  — относительное удлинение материала преграды на пятикратных образцах,  $KCU$  — ударная вязкость.

Таблица 2  
Динамический порог устойчивости  
и параметры внедрения кумулятивной струи в преграду

Материал преграды	$\sigma_i$ , ГПа	$h_{вн}$ , мм		$V_{cr}$ , м/с
		эксперимент	расчет	
12Х18Н10Т	1.57	8.2	8.2	565
28Х3СНМФА	3.45	7.6	7.2	895
38ХН3МФА	4.28	7.0	6.6	1 007
45ХНМФА	5.15	6.2	6.0	1 112
02Н18К9М5-ВИ	6.71	5.3	5.1	1 280
ХН75ВМЮ	4.42	7.2	7.1	989
ВТ-6	5.17	7.7	6.8	1 458
Д-16	0.58	16.2	15.8	440
М2	1.9	8.6	8.0	595
Гранит	—	30.2	24.5	—

лов, в частности откольная прочность. Так, на рис. 1 приведены профили свободной поверхности для двух одинаковых 5-миллиметровых мишеней из плавленого кварца, нагруженных при скоростях ударника  $U_{уд} = 98.4$  и  $224.8$  м/с. Видно, что откольная прочность тем ниже, чем выше скорость ударника. То есть при большей скорости структурный переход на плато импульса сжатия вызывает большую степень трещинообразования, чем при малой скорости, что и обуславливает понижение откольной прочности.

Аналогичная ситуация наблюдается для гранита (для него впервые были получены интерферограммы скорости свободной поверхности). На рис. 2 представлены времен-

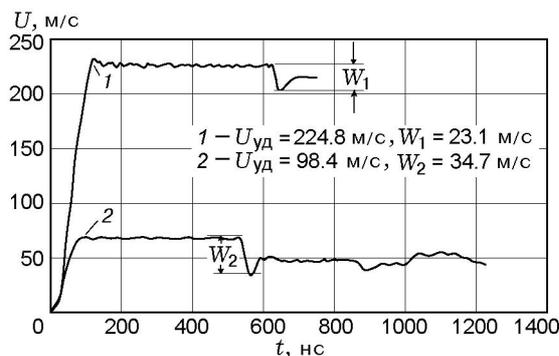


Рис. 1. Профили скорости свободной поверхности мишеней из плавленого кварца

ные профили скорости свободной поверхности, полученные при нагружении двух одинаковых 10-миллиметровых мишеней при скоростях ударника 92 и 117.5 м/с. Значение откольной скорости для первого профиля составляет 28 м/с. Что же касается второго профиля, то на плато импульса сжатия имеются только периодические колебания, вызванные процессом фрагментации материала, в то время как перепад скоростей свободной поверхности на заднем фронте импульса сжатия, характеризующий откольную прочность, полностью отсутствует. Приведенное на рис. 2 значение откольной скорости  $W_2 = 10.4$  м/с весьма условно. Это свидетельствует о том, что данный материал при скорости 117.5 м/с не оказывает сопротивления откольному разрушению. Как мы покажем ниже, этот результат хорошо коррелирует с результатами эксперимента по внедрению кумулятивных струй в гранитные преграды.

При проведении экспериментов по внедрению кумулятивных струй в полубесконечные преграды из тех же партий материалов, которые представлены в табл. 1, использовались удлиненные кумулятивные заряды марки УКЗ-9/4 [9] (материал оболочки и облицовки кумулятивной выемки — медь марки М1). Кроме того, в преграды из стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ-6 внедрялись медные струи УКЗ-10/4,5 и 13/6 (параметры приведены в табл. 3). Поскольку струи кумулятивного «ножа» УКЗ-9/4 имеют высокий градиент скорости по длине (9.3 мм), заряды устанавли-

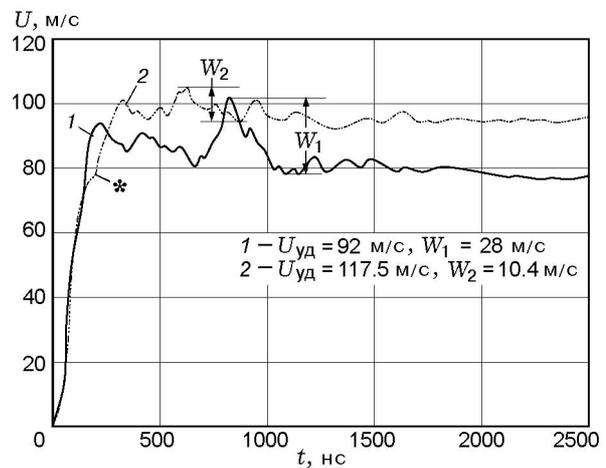


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности мишеней из гранита

Таблица 3

Параметры струй кумулятивных ножей УКЗ-10/4,5 и 13/6  
и глубины их внедрения в преграды из 12Х18Н10Т и ВТ-6

Марка УКЗ	$V_{\Gamma}$ , м/с	$V_x$ , м/с	$l_c$ , мм	$h_{\text{вн}}^{\text{экс}}$ , мм	$h_{\text{вн}}^{\text{п}}$ , мм
10/4.5	3 310	1 000	11.5	11.1 (12Х18Н10Т)	10.9 (12Х18Н10Т)
				9.3 (ВТ-6)	7.9 (ВТ-6)
13/6	3 060	900	14.0	13.3 (12Х18Н10Т)	13.0 (12Х18Н10Т)
				11.3 (ВТ-6)	9.6 (ВТ-6)

вали с помощью мерных пластин на оптимальное фокусное расстояние (9.3 мм) так, чтобы при растяжении на предельную длину не происходило их разрыва на отдельные фрагменты. В этом случае кинетическая энергия струи остается прежней, но градиент скорости исчезает или перераспределяется [10]. Аналогично поступали с двумя другими типами УКЗ; естественно, что их фокусные расстояния соответствовали их же предельным длинам струй. Глубину внедрения струй  $h_{\text{вн}}$  определяли с помощью мерного индикатора с точностью  $\pm 2\%$ , погрешность определения ( $\varepsilon_h$ ) при измерениях на 3–4 преградах при доверительной вероятности 0.9 составляла  $\varepsilon_h = (0.01 \div 0.07)h_{\text{вн}}$ .

Результаты определения глубины внедрения струй кумулятивного «ножа» УКЗ-9/4 приведены в табл. 2, УКЗ-10/4,5 и 13/6 — в табл. 3.

#### ГЛУБИНА ВНЕДРЕНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ В ПРЕГРАДУ И ЕЕ КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

С целью определения соответствия динамического порога устойчивости параметру  $B$  в уравнении (1) был проведен расчет глубины внедрения кумулятивных струй в преграды. При этом параметр  $A$  в уравнении (1) принимался равным динамическому пределу прочности медной струи  $\sigma_{\text{в,д}} = 325$  МПа [11]. Поскольку кумулятивная струя характеризуется градиентом скорости по длине (для примененного заряда УКЗ-9/4  $V_{\Gamma} = 3.22$  км/с — скорость головной части,  $V_x = 0.9$  км/с — скорость хвостовой части струи [9]), в расчетах для упрощения использовали эффективную скорость соударения, найденную из закона сохранения энергии

струи [1]:

$$V_{\text{eff}} = V_{\Gamma} \sqrt{\frac{1 + V_x/V_{\Gamma} + V_x^2/V_{\Gamma}^2}{3}}. \quad (3)$$

В данном случае  $V_{\text{eff}} \approx 2166$  м/с. Глубину внедрения кумулятивной струи в полубесконечную преграду находили по соотношению, предложенному В. П. Алексеевским [1]:

$$h_{\text{вн}}^{\text{п}} = l_c \frac{D - C}{1 - (D - C)}, \quad (4)$$

где  $l_c$  — длина струи,  $D = 1/[1 + (\rho_2/\rho_1)^{0.5}]$ ,  $C = (\sigma_i - \sigma_{\text{в,д}})/[V_{\text{eff}}^2 (\rho_1 \rho_2)^{0.5}]$ ,  $\sigma_{\text{в,д}}$  — динамическая прочность медной струи.

Рассчитывали также критическую скорость струи  $V_{\text{cr}}$ , при которой прекращается ее проникание в преграду ( $V_2 = 0$ ):

$$V_{\text{cr}} = \sqrt{\frac{2(\sigma_i - \sigma_{\text{в,д}})}{\rho_1}}. \quad (5)$$

Расчетные значения глубины внедрения, определенные по формулам (3) и (4), и критической скорости струи приведены в табл. 2.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Из результатов, представленных в табл. 2 и 3, следует, что хотя почти все расчетные значения глубины внедрения ниже экспериментальных, они все укладываются в статистическую погрешность (исключением является результат расчета для преграды из титанового сплава ВТ-6) измеренных глубин.

Из результатов по глубине внедрения струи в преграду из гранита видно, что экспериментальное значение этой величины превосходит даже гипотетическое значение, рассчитанное по гидродинамической модели для идеальной несжимаемой жидкости для данного материала. Это указывает на то, что ударная волна, бегущая впереди струи, разрушает хрупкий материал и он полностью теряет свою структурную устойчивость за счет образующихся трещин, облегчая тем самым условия для проникания струи (здесь наблюдается полная аналогия с поведением откольной прочности плавленого кварца и гранита в экспериментах по отколу). Эффект глубокого проникания струи в гранитную преграду в какой-то степени сродни эффекту «сверхглубокого» проникания частиц [12].

Расчетные значения критических скоростей, приведенные в табл. 2, вполне удовлетворительно сходятся с известными экспериментальными данными [1] и полученными другими методами результатами [13, 14].

Таким образом, на основании представленных экспериментально-расчетных результатов по внедрению струй кумулятивного «ножа» можно сделать вывод о том, что порог динамической устойчивости материала на сжатие может определять интегральную характеристику сопротивления материалов преград высокоскоростному внедрению. Данное утверждение требует более тщательного экспериментального исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика взрыва** / А. Ф. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Чернышев, Б. И. Шехтер. — М.: Наука, 1975.
2. **Гладков Н. А., Хайдин Ю. В., Ячник О. Е.** К вопросу определения скорости проникания деформирующегося стержня в преграду // *Механика импульсных процессов: тр. МВТУ.* — № 387. — С. 41–48.
3. **Лазарев В. Б., Баланкин А. С., Изотов А. Д., Кожушко А. А.** Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов. — М.: Наука, 1997.
4. **Айзенберг-Степаненко М. В.** Модель высокоскоростного внедрения ударника в среду // *Физ.-техн. пробл. разработки полезн. ископаемых.* — 2007. — № 3. — С. 45–64.
5. **Cook M. A.** Mechanism of cratering in ultrahigh velocity impact // *J. Appl. Phys.* — 1959. — V. 30, N 5. — P. 682.
6. **Hohler V., Stilp A. J.** Long-rod penetration mechanics // *High Velocity Impact Dynamics.* — N. Y.: J. Willey and Sons, Inc., 1990. — P. 321–404.
7. **Иванов А. Г.** О возможных причинах хрупких разрушений // *ПМТФ.* — 1988. — № 3. — С. 137–141.
8. **Мещеряков Ю. И., Диваков А. К.** О влиянии процессов на фронте импульса сжатия на откольную прочность и сопротивление высокоскоростному внедрению // *ПМТФ.* — 2003. — Т. 44, № 6. — С. 25–34.
9. **Ефанов В. В., Кузин Е. Н., Тимофеев В. Н., Челышев В. П.** Устройства и системы пироматериалов летательных аппаратов на основе линейных кумулятивных зарядов // *Полет.* — 2003. — № 10. — С. 42–49.
10. **Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В.** Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете // *ПМТФ.* — 1997. — Т. 38, № 2. — С. 3–9.
11. **Савенков Г. Г., Васильев Н. Н.** Пластичность и прочность меди при высокоскоростной деформации // *Пробл. прочности.* — 1993. — № 10. — С. 47–52.
12. **Григорян С. С.** О природе «сверхглубокого» проникания твердых микрочастиц в твердые материалы // *Докл. АН СССР.* — 1987. — Т. 292, № 6. — С. 1319–1323.
13. **Барахтин Б. К., Мещеряков Ю. И., Савенков Г. Г.** Микроструктура материалов и модель высокоскоростного проникания плоских кумулятивных струй // *ЖТФ.* — 1991. — Т. 61, вып. 6. — С. 8–12.
14. **Савенков Г. Г.** Высокоскоростное проникание плоских кумулятивных струй в нелинейные среды // *ПМТФ.* — 2004. — Т. 45, № 1. — С. 126–134.

*Поступила в редакцию 3/VII 2009 г.*