

03; 05.1

© 1992

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ
ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВНЕДРЕНИЮА.А. Кожушко, Г.С. Пугачев,
И.И. Рыкова, А.Б. Синани

Согласно гидродинамической теории соударения твердых тел [1], глубина внедрения ударяющего тела в преграду L связана с его длиной l соотношением

$$L = \lambda l, \quad (1)$$

где $\lambda = (\rho_2 / \rho_1)^{1/2}$, ρ_1 и ρ_2 — соответственно плотность преграды и ударяющего тела. Соотношение (1) хорошо выполняется в диапазоне скоростей соударения 10^3 – 10^4 м/с [2, 3].

При исследовании поведения твердых тел в указанном диапазоне скоростей соударения широко используются кумулятивные струи, характерной особенностью которых является наличие градиента скорости по их длине. Скорость кумулятивной струи в большинстве случаев изменяется от 8–10 км/с в головной части до 1.5–2 км/с в хвостовой [2]. Под влиянием разности скоростей кумулятивная струя в процессе своего движения удлиняется. Вследствие этого определить с достаточной точностью длину кумулятивной струи, образовавшейся в преграде каверну глубиной L , т.е. ее эффективную длину, невозможно. Предложенные аналитические методы оценки длины кумулятивной струи с учетом ее удлинения при движении в преграде (например, [4]) нельзя считать достаточно надежными.

При расчете глубины внедрения кумулятивной струи по (1), как правило, принято пользоваться сравнительными оценками. Расчет производится исходя из глубины внедрения в некоторый стандартный материал (например, в мягкую сталь), поведение которого описывается в рамках гидродинамической теории. Тогда глубина внедрения в исследуемый материал L_x и в стандартный L_c , согласно (1), находятся в отношении

$$L_x / L_c = (\rho_{1c} / \rho_{1x})^{1/2}. \quad (2)$$

В (2) предполагается, что длина кумулятивной струи l в обоих случаях была одной и той же.

Справедливость соотношения (2) подтверждена экспериментально, а наблюдавшиеся отклонения от него нашли удовлетворительное объяснение [2, 3]. Однако результаты экспериментального исследования зависимости глубины каверны от плотности материала преграды в широком диапазоне ее изменения дают основание поставить под сомнение универсальность соотношения (2).

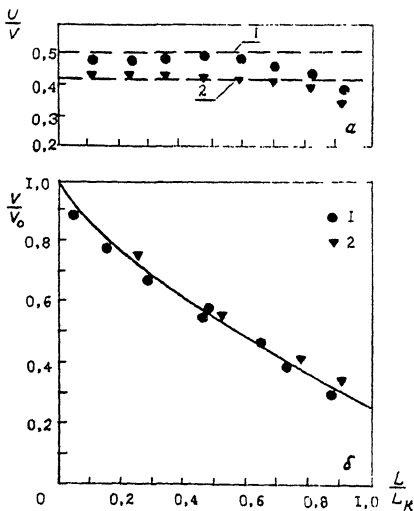


Рис. 1.

Рассмотрим в качестве примера внедрение кумулятивной струи в преграду из вольфрама, плотность которого более чем в два раза превышает плотность стали, выбранной как стандартный материал. Согласно (2), в этом случае $L_x/L_c = 0.67$. Экспериментальное значение $L_x/L_c = 0.49$ оказывается более чем на 25 % меньше расчетного.

Уменьшение глубины внедрения L_x по сравнению с рассчитанной по (2) принято объяснять двумя причинами.

Во-первых, глубина внедрения может быть меньше расчетной вследствие существенного дополнения инерционного сопротивления материала преграды сопротивлением его деформированию [2, 3, 5]. Сопротивление вольфрама, как и мягкой стали, определяется только инерционными силами, задаваемыми плотностью материала преграды. Показателем этого является соответствие экспериментальных величин отношения u/V скорости внедрения к скорости кумулятивной струи, рассчитанным согласно гидродинамической теории. На рис. 1, а приведены экспериментальные величины u/V (1 - сталь, 2 - вольфрам, пунктир - расчет) на различных стадиях внедрения (на глубинах внедрения L , отнесенных к конечной глубине каверны L_K). Представленные результаты свидетельствуют, что процесс внедрения в обоих случаях протекает согласно гидродинамической модели (наблюдающееся на конечных стадиях уменьшение u/V связано с занижением измеренной величины u при внедрении фрагментированной части кумулятивной струи [6, 7]).

Вторая причина уменьшения глубины внедрения L_x по сравнению с рассчитанной по (2) состоит в сокращении эффективной длины кумулятивной струи вследствие расходования отдельных ее элементов на стенках формируемой каверны. При этом часть струи из процесса внедрения исключается [2, 3]. На рис. 1, б приведено распределение скоростей кумулятивной струи V , нормированных на скорость ее головного элемента V_0 по относительной глубине каверны L/L_k в стали (1) и в вольфраме (2). Экспериментальные результаты в пределах точности опыта описываются единой зависимостью. Это свидетельствует о том, что соответствующие части каверны в стали и в вольфраме формируются элементами кумулятивной струи, имеющими одну и ту же скорость. Иными словами, в вольфраме не наблюдается более интенсивное, чем в стали, расходование элементов струи на стенках каверны.

Таким образом, в общепринятых позиций нельзя объяснить уменьшение глубины внедрения в вольфрам по сравнению с рассчитанной по (2), исходя из глубины внедрения в сталь. Анализ процесса движения кумулятивной струи в преграде дает основание рассматривать как возможную причину такого уменьшения влияния сопротивления преграды внедрению на эффективную длину кумулятивной струи и, тем самым, на конечную глубину каверны [7].

Выше отмечалось, что кумулятивная струя при движении в преграде удлиняется под влиянием разности скоростей по ее длине, и тем в большей степени, чем больший путь она проходит. Естественно, что в вольфраме на меньшем, согласно (1), пути, чем в стали, кумулятивная струя при прочих равных условиях удлиняется в меньшей степени. Кроме того, согласно (1), на заданном пути ΔL в преграде расходует часть кумулятивной струи тем большей длины Δl , чем больше плотность преграды, т.е.

$$\Delta l_x / \Delta l_c = (\rho_{1x} / \rho_{1c})^{1/2}. \quad (3)$$

Из (3) очевидно, что при внедрении в вольфрам кумулятивная струя расходует более интенсивно, чем при внедрении в сталь. Следовательно, более интенсивно расходуются элементы кумулятивной струи, которые способны к дальнейшему удлинению при движении в преграде.

В результате при движении в преграде из вольфрама возможность удлинения кумулятивной струи гораздо более ограничена, чем в преграде из стали. Это значит, что при внедрении в преграду с большей плотностью реализуется меньшая эффективная длина кумулятивной струи. При расчетах по (2) этот фактор не учитывается.

Таким образом, при изменении плотности материала преграды необходимо принимать во внимание новый фактор — зависимость эффективной длины кумулятивной струи от инерционного сопротивления преграды внедрению. Сокращение эффективной длины кумулятивной струи, связанное с влиянием сопротивления внедрению, следует учитывать не только при изменении плотности преграды. Такое влияние должно иметь место, в частности, при значительном

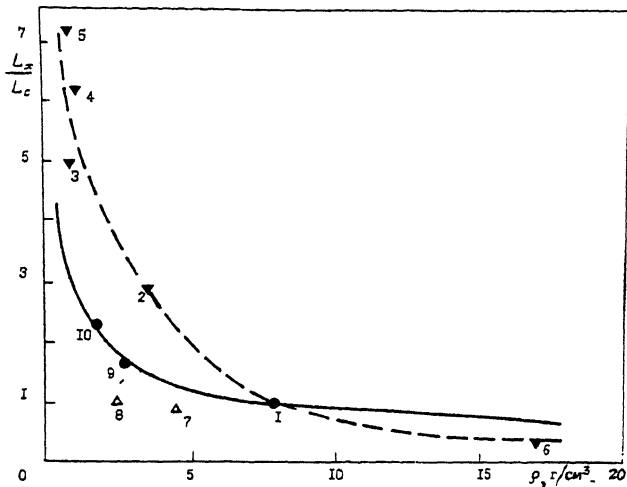


Рис. 2.

дополнении инерционного сопротивления преграды с заданной плотностью сопротивлением ее деформированию [5].

Зависимость эффективной длины кумулятивной струи от плотности материала преграды имеет общий характер: при внедрении в материалы более плотные, чем стандартный, глубина каверны L_x закономерно уменьшается сравнительно с расчетом по (2), в менее плотные — увеличивается. О такой закономерности свидетельствует зависимость L_x/L_c от плотности материала преграды ρ (рис. 2). Здесь сплошной линией представлена зависимость, рассчитанная по (2). Экспериментальные значения L_x/L_c приведены для стали как стандартного материала (1), бетона (2), полиэтилена (3), полиуретана (4), парафина (5), вольфрама (6), титанового сплава ВТ-6 (7), силикатного стекла (8), алюминия (9) и магния (10).

Отклонения в сторону меньших значений L_x для силикатного стекла и сплава ВТ-6 объяснимы с известных позиций: в первом случае — влиянием прочности на сопротивление внедрению [5, 8], во втором — сокращением длины кумулятивной струи при взаимодействии со стенками каверны [2, 3].

Глубины внедрения в малоплотные и малопрочные материалы с одной стороны и в вольфрам с другой можно описать зависимостью, представленной пунктирной кривой. Эта зависимость учитывает изменение с плотностью преграды и инерционного сопротивления, и изменение с ним эффективной длины кумулятивной струи.

Совпадение экспериментальных значений L_x для алюминия и магния с рассчитанными по (2) нельзя считать закономерным. Для внедрения в подобные материалы характерно сокращение эффективной длины кумулятивной струи при взаимодействии со стенками каверны. Оно может быть скомпенсировано увеличением эффективной длины вследствие более низкого по сравнению со сталью инерционно-

го сопротивления внедрению. Именно такой компенсацией можно объяснить наблюдающееся и для некоторых других материалов совпадение расчетных и экспериментальных величин L_x , которые, по существу, имеет формальный характер.

Анализ имеющихся результатов позволяет сделать следующее заключение. Сопротивление материала преграды внедрению кумулятивной струи влияет на условия ее удлинения и, тем самым, на ее эффективную длину. Этот ранее не учитываемый фактор обуславливает значительное отличие глубины внедрения от рассчитанной на основе известных соотношений гидродинамической теории. При расчетных оценках глубины внедрения кумулятивной струи необходимо принимать во внимание зависимость ее эффективной длины от сопротивления материала преграды внедрению.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Л а в р е н т ь е в М.А. // УМН. 1957. Т. 12. № 4. С. 41.
- [2] Физика взрыва / Под ред. Станюковича К.П. М.: Наука, 1975.
- [3] Ш а л ь Р. Физика быстропротекающих процессов. М.: Мир, 1971. Т. 2. 276 с.
- [4] S i n g h S. // Proc. Nat. Inst. of Sci. Ind. 1953. V. 19. N 3. P. 357.
- [5] З л а т и н Н.А., К о ж у ш к о А.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 2. С. 330.
- [6] E i c h e l b e r g e r R. // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. N 1. P. 63.
- [7] H e l d M. 10-th Int. Symp. on Ballistics. 1987. P. 1.
- [8] К о з х у ш к о А.А., Р у к о в а И.И., S i n a n i А.В. // Journ. de Physique IV. 1991. V. 1. С. 3. P. 117.

Поступило в Редакцию
25 февраля 1992 г.