

03;05.1
©1993 г.

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ С ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИТАМИ

А.С.Власов, А.А.Кожушко, И.И.Рыкова

Композиционные материалы на полимерной основе и, в частности, стеклопластики, характеризуются большой величиной удельной работы деформирования (отношения H_D/ρ динамической твердости и плотности). Это качество обуславливает высокий уровень сопротивления их внедрению ударяющего тела при скоростях взаимодействия до ~ 1 км/с, когда прочностные и инерционные силы сопротивления внедрению соизмеримы. В области более высоких скоростей соударения процесс взаимодействия твердых тел, как правило, описывается в рамках гидродинамической теории [1]. Согласно этой теории, сопротивление внедрению определяется только инерционными силами, по сравнению с которыми влиянием прочности взаимодействующих тел и их сжимаемости (изменением внутренней энергии) можно пренебречь.

Согласно [2], гидродинамическая модель применима к стеклопластикам при скоростях внедрения (движения ударяющего тела в преграде) U в диапазоне $1.5 \lesssim U \lesssim 4$ км/с. Именно такими скоростями характеризуется внедрение кумулятивной струи (КС). Однако опыт показывает, что во многих случаях глубина внедрения КС (глубина кратера) L в преградах из стеклопластиков значительно меньше, чем следует из расчета по гидродинамической модели, согласно которому

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

где $\lambda = (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$, ρ_2 и ρ_1 — соответственно плотности КС и преграды, l — длина КС.

Цель настоящей работы состояла в исследовании факторов, определяющих отмеченное отклонение от расчета.

В общем случае отклонения от расчета по гидродинамической модели объясняются тем, что в определенных условиях нельзя пренебречь влиянием прочности или сжимаемости на сопротивление внедрению [2,3]. Кроме того, в случае внедрения КС прочность материала преграды может влиять на глубину внедрения через диаметр образующегося кратера [4,5].

С увеличением прочности материала преграды радиус кратера уменьшается, и при этом повышается вероятность расходования отдельных элементов КС на стенках кратера. В результате эти элементы исключаются из процесса внедрения. Таким образом, эффективная длина КС l , т.е. длина КС, израсходованной на образование кратера глубиной L , сокращается и, согласно (1), уменьшается конечная глубина внедрения КС в преграду.

Для оценки сил сопротивления внедрению достаточную информацию дают измерения распределения скоростей КС V и скоростей внедрения U по глубине кратера L . Зависимость $V(L)$ характеризует интенсивность расходования КС на заданном пути ΔL в преграде, а отношение скоростей U/V — уровень сопротивления материала преграды внедрению. Согласно гидродинамической модели,

$$U/V = \lambda/(1 + \lambda), \quad (2)$$

и уменьшение этой величины при заданной λ свидетельствует о повышении сопротивления внедрению под влиянием прочности или сжимаемости материала преграды.

На рис. 1 приведено распределение величин V , U и U/V по глубине кратера L для преград из стеклотекстолита СТБ-3-02 и магниевый сплав МА-2, имеющих близкие плотности (соответственно 1.85 и 1.80 г/см³) и физико-механические характеристики. Магниевый сплав выбран как исходный для сравнения материал, ведущий себя в условиях взаимодействия с КС в соответствии с гидродинамической моделью.

Кривые $V(L)$ для стеклопластика и магниевый сплав существенного различия не обнаруживают. Это указывает на то, что на образование элемента кратера заданной глубины ΔL в той и другой преграде расходуются элементы КС с близкой разностью скоростей ΔV , т.е. имеющие близкую длину Δl . Если обратиться к отношению U/V , то при внедрении в стеклопластик наблюдается некоторое его уменьшение по сравнению с расчетом по (2) лишь на начальной стадии процесса при сверхзвуковых скоростях внедрения. Это естественно связать с влиянием сжимаемости преграды [6] на сопротивление внедрению.

Однако на конечный результат процесса этот фактор существенного влияния оказать не может. На большей части пути КС в преграде из стеклопластика экспериментальные значения U/V близки к расчетным (уменьшение U/V на поздних стадиях внедрения в магниевый сплав и в стеклопластик связано с занижением величины U при измерении электроконтактным методом [7]).

Таким образом, данные измерения кинематических характеристик процесса внедрения дают основание считать, что внедрение в стеклопластик может быть в физически оправданном приближении описано в рамках гидродинамической модели. Вместе с тем, обращает на себя внимание тот факт, что придонная часть кратера

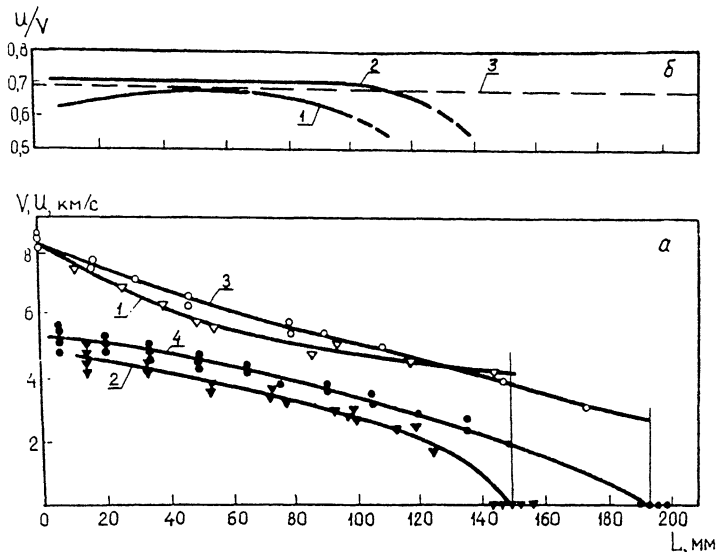


Рис. 1. а — распределение по глубине кратера L скоростей КС V и скоростей внедрения U : для стеклопластика — кривые 1 и 2, для магниевого сплава — кривые 3 и 4; б — отношение скоростей U/V в зависимости от глубины внедрения КС L в стеклопластик (1) и магниевый сплав (2). 3 — расчет по формуле (2).

в стеклопластеке образуется элементами КС, имеющими скорость на ~ 1.5 км/с более высокую, чем в магниевом сплаве, а конечная глубина внедрения в стеклопластик на $\sim 20\%$ меньше.

Эти данные указывают на то, что низкоскоростные элементы КС из процесса внедрения в стеклопластик исключаются, и эффективная длина КС становится меньше, чем при внедрении в магниевый сплав.

Выше отмечалось, что сокращение длины КС есть результат частичного ее расходования на стенках кратера. Это происходит вследствие того, что возмущения, возникающие в КС при ее формировании или фрагментировании в процессе движения, вызывают нарушение осевой симметрии отдельных элементов [5]. Смещенные относительно оси КС элементы расходуются на стенках кратера и не дают приращения его глубины. Рассмотренный эффект сильно выражен в преградах из металлических материалов, как правило, при больших расстояниях между кумулятивным зарядом и преградой (более 3–4 диаметров заряда), при которых смещение элементов КС становится соизмеримым с радиусом кратера. В проведенных опытах расстояние между зарядом и преградой составляло 1.5 диаметра заряда. По имеющимся представлениям, в этих условиях значительное сокращение эффективной длины КС происходить не должно.

Таким образом, следующей задачей было исследование причин сокращений эффективной длины КС, наблюдающегося при внедрении в стеклопластик.

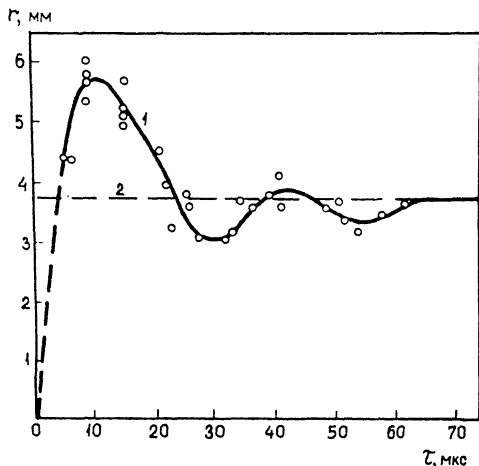


Рис. 2. Зависимость радиуса кратера r в преграде из стеклопластика от времени τ .

Для исследования этого вопроса естественно обратиться к величине радиуса кратера в процессе внедрения в стеклопластик. С этой целью путем импульсного рентгенографирования определялся текущий радиус кратера на различных глубинах, т.е. при различных скоростях внедрения КС.

В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость радиуса кратера r от времени τ для скорости внедрения $U = 4.5$ км/с. Несмотря на разброс экспериментальных точек, полученных в большой серии опытов, зависимость имеет выраженный колебательный характер. Обращают на себя внимание следующие особенности зависимости $r(\tau)$. Конечный радиус кратера значительно меньше максимального. По достижении максимального радиуса (через 10 мкс после начала внедрения КС) изменение $r(\tau)$ имеет характер затухающих колебаний относительно конечного радиуса кратера.

Измерения радиуса кратера при различных скоростях внедрения показывают, что с уменьшением скорости колебания радиуса выражены слабее, и различие между максимальным и конечным значениями нивелируется. Существенно отметить, что при внедрении в преграды из металлических материалов (алюминиевые и магниевые сплавы) конечный радиус кратера практически совпадает с максимальным, а текущие его значения в процессе внедрения не изменяются.

Изменение радиуса кратера в стеклопластике во времени можно связать с особенностями расходящейся ударной волны, которая образуется в преграде при внедрении КС и в значительной степени определяет радиальное расширение кратера. Такая волна имеет сложную структуру: за областью сжатия перемещается область растяжения [8]. Таким образом, частицы среды при распространении расходящейся волны совершают колебательное движение [9]. Такой характер движения определяет возможность перемещения материала к оси кратера. В металлах этот эффект выражен весьма слабо. Значительные колебания стенок в преградах из стекло-

пластика вызываются, прежде всего, существенно более сильно сжимаемостью стеклопластиков по сравнению с металлами и, во-вторых, отличиями в упруго-пластическом поведении этих материалов. Рассматриваемая модель требует дальнейшего уточнения.

Периодическое смыкание кратера к оси в процессе внедрения естественно, приводит к усилению расходования элементов КС в его стенках. При этом в стеклопластике при прочих равных условиях эффективная длина КС сокращается в большей степени, чем в металлах.

Полученные экспериментальные результаты и их анализ свидетельствуют о том, что основной причиной уменьшения глубины внедрения КС в стеклопластики является сокращение ее эффективной длины в результате взаимодействия со смыкающимися стенками кратера. Этот процесс — следствие сильной ударно сжимаемости стеклопластиков. Он должен иметь место в других сильносжимаемых средах.

В заключение следует отметить общую закономерность влияния прочности и сжимаемости материала преграды в условиях внедрения КС, когда роль этих факторов в сопротивлении внедрению пренебрежимо мала, и процесс описывается в рамках классической гидродинамической теории. При скоростях внедрения достаточно высоких, чтобы прочностным сопротивлением внедрению можно было уже пренебречь, прочностные свойства преграды влияют на радиальные размеры кратера и, тем самым, на эффективную длину КС [4,5]. Подобным же образом проявляется влияние сжимаемости преграды при дозвуковых скоростях внедрения, когда эффектами ударного сжатия материала преграды в сопротивлении внедрению можно еще пренебречь.

Установление влияния сжимаемости материала преграды на радиальные размеры кратера в процессе внедрения КС и, в конечном итоге, на результат взаимодействия, следует рассматривать как основной результат настоящей работы.

Список литературы

- [1] Лаврентьев М.А. // УМН. 1957. Т. 12. В. 4. С. 41–52.
- [2] Сагомонян А.Я. Проникание. М.: МГУ, 1974. 299 с.
- [3] Златин Н.А., Кожушко А.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 3. С. 330–334.
- [4] Шалль Р. В кн.: Физика быстропотекающих процессов. М.: Мир, 1971. Т. 2. С. 277–344.
- [5] Held M. // Proc. 7-th Intern. Symp. on Ballistics, den Haag. 1983. P. 333–339.
- [6] Валицкий В.П., Златин Н.А., Кожушко А.А. // ЖТФ. 1967. Т. 37. С. 2099–2101.
- [7] Eichelberger R. // J. Appl. Phys. 1956. V. 27. N 1. P. 63–68.
- [8] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
- [9] Райнхарт Дж., Лирсон Дж. Взрывная обработка металлов. М.: Мир, 1966. 390 с.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
22 апреля 1993 г.