

УДК 539.3

© 1994 г. В. А. ГОРЕЛЬСКИЙ, С. А. ЗЕЛЕПУГИН, В. Ф. ТОЛКАЧЕВ

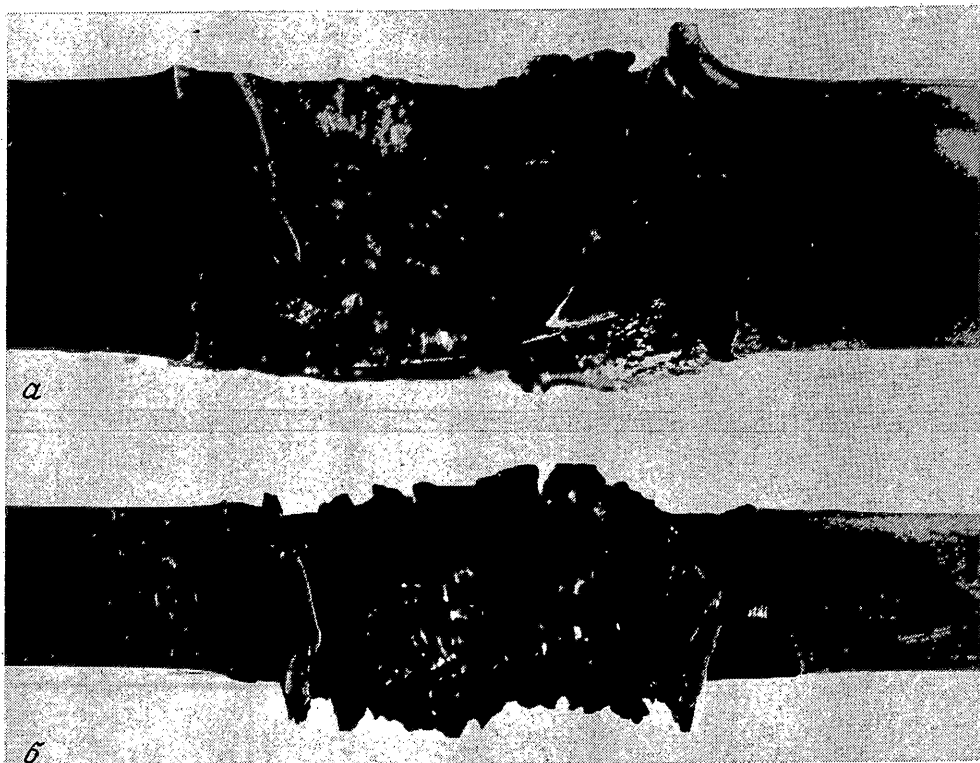
## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБИВАНИЯ ПРЕГРАД ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ С УЧЕТОМ РАЗРУШЕНИЯ И ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ

Рассматривается влияние температурных эффектов и разрушения на процесс высокоскоростного взаимодействия металлических тел с плоскими преградами в диапазоне скоростей встречи до 3500 м/с. Проведено экспериментально-теоретическое исследование разрушения пластин в процессе динамического контакта с цилиндрическими телами при углах встречи до 75°. Кинетика образования приповерхностных повреждений и особенности разрушений при пробивании пластин и рикошетировании были исследованы численным методом конечных элементов в плоской постановке с использованием кинетической модели разрушения активного типа. Приведены графики, характеризующие динамику частиц и эволюцию интегральных энергетических параметров в процессе взаимодействия.

1. Введение. Для корректного описания воздействия взрывных и ударных нагрузок на конструкционные материалы в ряде случаев требуется учет влияния тепловых эффектов и разрушений на прочностные характеристики материала среды [1, 2]. Хотя на практике в большинстве случаев реализуются условия несимметричного нагружения, до настоящего времени преобладают работы, посвященные осесимметричным задачам высокоскоростного удара [3—5]. Различные аспекты проблем разрушения, исследованные теоретически с использованием кинетических моделей развития повреждений различных типов при осесимметричном ударе отражены в [6—10]. В работах, посвященных несимметричному удару, следует отметить большое внимание, уделяемое проблеме рикошетирования [11—14]. Однако в этих работах в основном авторы ограничиваются определением критериев рикошета, а не полному исследованию процесса взаимодействия. Детальное исследование процесса рикошетирования, проведенное в [15], показало, что основная нагрузка на преграду в ряде случаев происходит при ударе по ней тыльным концом рикошетирующего ударника, а не взаимодействием с преградой его головной части. Еще более картина усложняется при разрушении удлиненных ударников.

В [16] показано, что при небольших углах встречи при высокоскоростном ударе происходит срезание тыльной части ударника вследствие возникающих при торможении инерционных сил и затем внедрение этой отделившейся части ударника позади первого кратера. В случае, если у отделившейся части ударника длина значительно превышает диаметр, процесс срезания тыльной части остатка ударника может повториться. В отсутствие рикошета и сохранении целостности снаряда при достаточно высоких скоростях встречи наблюдается процесс устойчивого проникания ударника в плиту.

Работы, посвященные глубокому прониканию удлиненных ударников при несимметричном взаимодействии в двух- и трехмерной постановках, позволяют оценить лишь приблизительно параметры процесса как вследствие доступной в расчетах дискретизации тел, так и допущений, используемых при расчете контактных границ [17, 18]. Реализация на контактных поверхностях условий слияния позволяет с высокой точностью проводить расчеты начального этапа внедрения, причем лишь при небольших углах подхода [19, 20]. Более детальное исследование пространственного разрушения ударников при несимметричном ударе проведено при их взаимодействии с недеформируемой преградой [16, 20]. Однако реально исследовать динамику многих практически важных задач несимметричного удара с учетом разрушения в настоящее время удается лишь в плоской постановке [22]. В частности в [23, 24] представлены результаты исследований разрушений пластин при взаимодействии с ними под углом нескольких высокоскоростных частиц. Помимо того, что исследования двумерных задач представляют самостоятельный интерес, на основе полученных в плоской постановке решений можно



Фиг. 1

делать оценки и для трехмерных задач [25]. Однако в проведенных до сих пор расчетах несимметричного удара как в двух-, так и в трехмерной постановках не уделялось внимания исследованию температурных эффектов. Вместе с тем ясно, что для корректного описания процессов деформирования и разрушения тел при несимметричном нагружении необходимо учитывать зависимость характеристик материала от температуры. В публикуемой работе численное моделирование высокоскоростного удара в широком диапазоне углов встречи проводится с учетом температурных полей, реализующихся во взаимодействующих телах.

2. Экспериментальные результаты. Исследование взаимодействия твердых тел с пластинами в условиях несимметричного контакта представляет собой сложную задачу механики сплошной среды. Эксперименты свидетельствуют, что с изменением угла встречи и толщины пластин характер разрушения пластин существенно меняется. Однако факторы, определяющие особенности пробивания преград и кратерообразование в них при несимметричном ударе, а также механизмы образования приповерхностных повреждений до сих пор достаточно не исследованы.

На фиг. 1, *a* представлена фотография разреза кратера, образованного в стальной пластине толщиной 15 мм компактным 8×8 мм стальным цилиндром, имеющим скорость 3185 м/с и угол встречи 30°. Фотография иллюстрирует наличие лицевого и тыльного отколов. Форма кратера свидетельствует, что часть материала ударника, двигавшегося с левой стороны, рикошетирует, придав верхней половине передней стенки кратера скошенный характер. Нижняя половина передней стенки кратера и вся тыльная стенка образуют слегка суживающийся к низу кратер. Фотография позволяет также проследить влияние внедряющегося тела на характер приповерхностных повреждений, которое сводится к следующему. По ходу движения тела происходит подавление возникших ранее лицевых разрушений.

Другой особенностью этого кратера является наличие на лицевой поверхности пластины отогнутой вверх закраины по ходу движения тела, формированию и сохранению которой способствует разлет под большим углом рикошетирующей части ударника. Вследствие возникающей в пластине асимметрии течения наблюдается сдвиг оси тыльной откольной тарелочки по ходу движения относительно оси симметрии лицевого откольного кольца. Особенно отчетливо заметен этот сдвиг на фиг. 1, *б*, где

представлен разрез кратера с сохранившимися следами лицевого откола по обе стороны ударника. Эта фотография представляет разрез кратера, образованный в стальной пластине толщиной 10 мм при ударе по ней цилиндра 8×8 мм со скоростью 3450 м/с и угле подхода 30°. Кратер в данном случае имеет форму, близкую к симметричной и основной особенностью, определяемой направлением движения ударника, является сдвиг зоны тыльных откольных разрушений в направлении движения ударника относительно области лицевого откола.

Эксперименты проведенные для широкого диапазона углов встречи показывают, что при увеличении угла встречи свыше 45° вблизи лицевой поверхности откольных разрушений не наблюдается. Тыльный откол, развитию которого способствует внедряющийся ударник, продолжает иметь место. Полный рикошет ударника при отсутствии заметных разрушений в приповерхностных областях имеет место при угле встречи 60° и выше. Горизонтальные сечения кратера в этом случае являются эллипсами, большая ось которых ориентирована в направлении движения. При угле встречи 75° кратер изменяет свою форму и представляет собой конус, вершина которого соответствует точке первоначального контакта, переходящий в эллипсоид. С целью выявления кинетики образования приповерхностных повреждений и особенностей пробивания пластин при несимметричном взаимодействии были проведены расчеты численным методом конечных элементов.

**3. Методика расчетов.** В работе используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся наличием микрополостей (пор, трещин) [26]. Общий объем среды  $W$  составляют неповрежденная часть среды, занимающая объем  $W_c$  и характеризующаяся плотностью  $\rho_c$  и микрополости, занимающие объем  $W_T$ , в которых плотность полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением  $\rho = \rho_c W_c / W$ . Степень поврежденности среды характеризуется согласно [27] удельным объемом трещин  $V_T = W_T / (W \rho)$ . Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические движения сжимаемой среды с учетом развития и накопления микроповреждений для случая плоской симметрии, состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, изменения удельного объема трещин

$$\dot{\rho} = -\rho (v_{1,x_1} + v_{2,x_2}) \quad (3.1)$$

$$\rho \dot{v}_1 = S_{11,x_1} + S_{12,x_2} - P_{,x_1} \quad (3.2)$$

$$\rho \dot{v}_2 = S_{12,x_1} + S_{22,x_2} - P_{,x_2} \quad (3.3)$$

$$\rho \dot{E} = P \dot{\rho} / \rho + S_{11} v_{1,x_1} + S_{22} v_{2,x_2} + S_{12} (v_{1,x_2} + v_{2,x_1}) \quad (3.4)$$

$$\dot{V}_T = 0 \text{ при } |P_c| \leq P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_T = 0), P^* = P_k V_1 / (V_T + V_1)$$

$$\dot{V}_T = -\text{sign}(P_c) K_4 (|P_c| - P^*) (V_2 + V_T) \text{ при } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_T > 0) \quad (3.5)$$

Здесь  $x_1, x_2$  — координаты относительно первой (горизонтальной) и второй (вертикальной) осей;  $S_{11}, S_{22}, S_{12}$  — компоненты девиатора напряжений;  $v_1, v_2$  — компоненты вектора скорости,  $E$  — удельная внутренняя энергия,  $P, P_c$  — среднее давление и давление в сплошной компоненте вещества,  $V_1, V_2, P_k, K_4$  — экспериментально определяемые константы материала.

Моделирование разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа, определяющей рост микротрещин, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений. Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема, внутренней энергии и удельного объема трещин

$$P_c = \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0 / 2 + 2(b - 1)] \mu^2 + \rho_0 a^2 [2(1 - \gamma_0 / 2)(b - 1) + 3(b - 1)^2] \mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E, \mu = V_0 / (V - V_T) - 1 \quad (3.6)$$

где  $\gamma_0$  — коэффициент Грюнайзена,  $V_0$  и  $V$  — начальный и текущий удельные объемы,  $a$  и  $b$  — константы из адиабаты Гюгонио, описываемой линейным соотношением [28, 29]:

$$D = a + bu \quad (3.7)$$

где  $D$  — скорость фронта ударной волны,  $u$  — массовая скорость вещества за фронтом ударной волны. Среднее давление в поврежденной среде определяется по формуле  $P = P_{c\rho}/\rho_c$ . Константы девиатора напряжений находятся из соотношений

$$2G(v_{1,x_1} + \dot{\rho}/3\rho) = S_{11}^v + \lambda S_{11} \quad (3.8)$$

$$2G(v_{2,x_2} + \dot{\rho}/3\rho) = S_{22}^v + \lambda S_{22}$$

$$2G(\dot{\rho}/3\rho) = \dot{S}_{33} + \lambda S_{33}, \quad 2G(v_{1,x_2} + v_{2,x_1}) = S_{12}^v + \lambda S_{12}$$

Параметр  $\lambda = 0$  при упругой деформации, а при наличии пластической ( $\lambda \geq 0$ ) определяется с помощью условия текучести Мизеса

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 2\sigma^2/3 \quad (3.9)$$

В соотношениях (3.8), (3.9)  $G$  — модуль сдвига,  $S_1, S_2, S_3$  — главные компоненты девиатора напряжений,  $\sigma$  — динамический предел текучести, а галочка означает производную по Яуманну. Модуль сдвига и динамический предел текучести определялись согласно соотношениям:

$$G = G_0[1 + cP/(1 + \mu)^{1/3} + h(T - 300)]V_3/(V_T + V_3) \quad \text{при } T \leq T_m$$

$$G = 0 \quad \text{при } T > T_m \quad (3.10)$$

$$\sigma = \sigma_0[1 + cP/(1 + \mu)^{1/3} + h(T - 300)](1 - V_T/V_4) \quad \text{при } T \leq T_m \text{ и } V_T \leq V_4$$

$$\sigma = 0 \quad \text{при } T > T_m \text{ или } V_T > V_4$$

Здесь  $T_m$  — температура плавления вещества,  $c, h, V_3$  и  $V_4$  — экспериментально определяемые константы материала. Значение температуры вычислялось согласно [29]:

$$T = (E - E_{0x})/c_p = [E - E_0 - E_1\mu - (-E_1 + E_2)\mu^2 - (E_1 - 2E_2 + E_3)\mu^3 - (-E_1 + 3E_2 - 3E_3 + E_4)\mu^4]/c_p \quad (3.11)$$

$$E_0 = -300c_p, \quad E_1 = \gamma_0 E_0, \quad E_2 = (a^2 + \gamma_0^2 E_0)/2$$

$$E_3 = (4ba^2 + \gamma_0^4 E_0)/16, \quad E_4 = (-2\gamma_0 ba^2 + 18b^2 a^2 + \gamma_0^4 E_0)/24$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость,  $E_{0x}$  — холодная составляющая удельной внутренней энергии.

В плоской постановке рассматривается задача взаимодействия компактной стальной частицы, занимающей область  $D_1$ , с пластиной, занимающей область  $D_2$  при произвольном угле встречи  $\alpha_0$ . Для приведенных выше уравнений (3.1) — (3.11) ставится задача с начальными при  $t = 0$  и заданными на поверхностях граничными условиями. Начальные условия имеют вид

$$S_{11}(0, x_1, x_2) = S_{22}(0, x_1, x_2) = S_{33}(0, x_1, x_2) = S_{12}(0, x_1, x_2) = \\ = P(0, x_1, x_2) = E(0, x_1, x_2) = V_T(0, x_1, x_2) = 0 \quad ((x_1, x_2) \in D_1 \cup D_2)$$

$$v_2(0, x_1, x_2) = v_0 \cos \alpha_0 \quad ((x_1, x_2) \in D_1)$$

$$v_1(0, x_1, x_2) = v_0 \sin \alpha_0 \quad ((x_1, x_2) \in D_1)$$

$$v_1(0, x_1, x_2) = v_2(0, x_1, x_2) = 0 \quad ((x_1, x_2) \in D_2)$$

$$\rho(0, x_1, x_2) = \rho_0 \quad ((x_1, x_2) \in D_1 \cup D_2)$$

На свободных поверхностях выполняются соотношения  $T_{NN} = T_{N\tau} = 0$ ; на контактной поверхности между ударником и пластиной в расчетах реализуются условия идеального скольжения  $T_{NN}^+ = T_{NN}^-$ ,  $T_{N\tau}^+ = T_{N\tau}^-$ ,  $v_N^+ = v_N^-$ . Здесь  $N$  — единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке,  $\tau$  — единичный вектор касательной к поверхности в этой точке,  $T_N$  — вектор силы на площадке с нормалью  $N$ ,  $v$  — вектор скорости. Нижние индексы у векторов  $T_N$  и  $v$  обозначают проекции на соответствующие вектора базиса, индекс плюс характеризует значения параметров в материале на верхней границе контактной поверхности, индекс минус — на нижней.

Использованные для решения поставленной задачи соотношения метода конечных элементов изложены в [15, 24].

4. Расчеты. В расчетах моделировалось взаимодействие стальной частицы сечением  $8 \times 8$  мм со стальной пластиной толщиной 10 мм. Были использованы следующие значения констант материала:  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $G_0 = 79$  ГПа,  $\epsilon_0 = 0,87$  ГПа,  $a = 4400$  м/с,  $b = 1,55$ ,  $\gamma = 1,91$ ,  $c_p = 446,7$  Дж/кг·К,  $T_m = 1809$  К,  $\Delta H_m = 277$  кДж/кг,  $c = 206$  ГПа<sup>-1</sup>,  $h = -1,6 \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>,  $P_k = -1,5$  ГПа,  $V_1 = 9,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг,  $V_2 = 5,7 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>/кг,  $V_3 = 2,56 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/кг,  $V_4 = 6,41 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/кг,  $K_4 = 0,52$  м·с/кг.

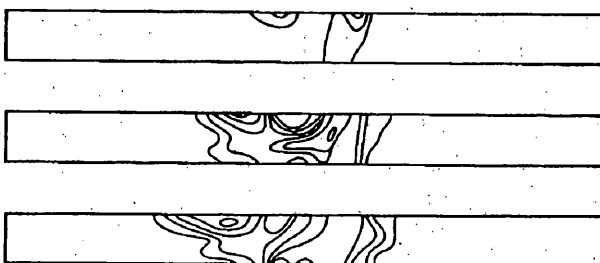
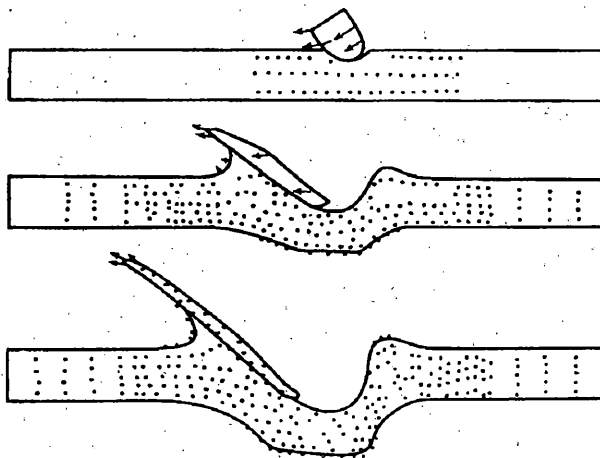
Расчеты проводились для случая плоской симметрии в диапазоне углов встречи от 15° до 60°.

Результаты расчета взаимодействия металлического цилиндра с пластиной при угле встречи 60° и скорости удара 3500 м/с представлены на фиг. 2. Расчетные хронограммы процесса соответствуют моментам времени 2, 8 и 14 мкс и свидетельствуют о полном рикошетирувании ударника, что наблюдается и в эксперименте. Распределения изменений удельного объема трещин представлены в моменты времени 4,8 и 14 мкс. Рисунки показывают, что интенсивность ударно-волновых процессов в пластине в этом случае недостаточна для возникновения в ней откольных повреждений. Из расчетов следует, что разрушения в пластине обусловлены в основном большими деформациями, вызванными внедряющимся ударником. Очаги разрушения, образованные по обе стороны ударника к моменту времени 4 мкс, в дальнейшем ведут себя следующим образом. Передний очаг разрушения остается локализованным в приповерхностном слое и распространяется по ходу движения ударника. Находящийся сзади очаг разрушения, напротив, распространяется вглубь пластины. Это показывает, что при угле встречи 60° разрушения в пластине позади ударника после 10 мкс обусловлены инерционным растеканием. Таким образом, за счет инерционного растекания в пластине образуется сквозная пробоина, хотя ударник, как показывает расчет, полностью рикошетирует.

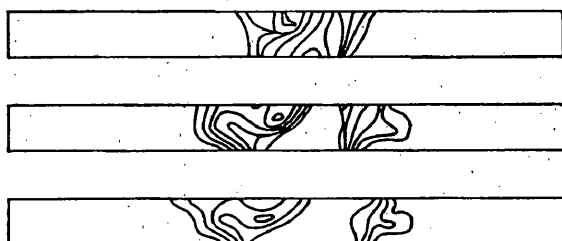
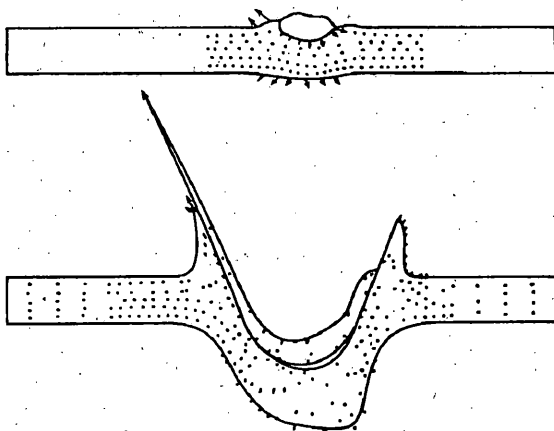
Иной механизм пробоя реализуется при угле подхода 15°. На фиг. 3 представлены хронограммы процесса взаимодействия ударника со стальной преградой толщиной 10 мм со скоростью 3500 м/с в моменты времени 2 и 14 мкс и распределения изолиний удельного объема трещин в моменты времени 4,8 и 14 мкс. Из рисунка следует, что в данном случае материал ударника практически полностью проникает в запреградное пространство. В пробое преграды в этом случае большую роль играют откольные разрушения, что согласуется с фотографиями фиг. 1.

Представленные на фиг. 3 расчетные распределения изолиний удельного объема трещин свидетельствуют, что к 14 мкс, когда основная часть ударника выходит за линию тыльной поверхности преграды, соответствующую начальному моменту времени, в преграде формируются области лицевого и тыльного отколов, причем область тыльного откола смещена по ходу движения ударника. Суммарная толщина откольных разрушений составляет примерно половину толщины пластины, что говорит о значительном развитии откольных явлений и большом их вкладе в механизм пробоя пластин рассматриваемой толщины.

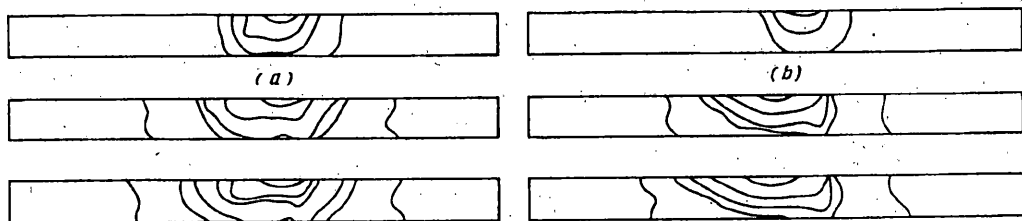
Влияние температурных эффектов на характер взаимодействия твердых тел при несимметричном высокоскоростном ударе позволяет оценить фиг. 4. Распределения изолиний температур в преграде в моменты времени 2, 8 и 14 мкс даны для углов встречи 15° (а) и 60° (б). Первой изолинии соответствует температура 309 К, интервал температур между соседними изолиниями 150 К. Скорость подлета ударника в данном случае равнялась 3500 м/с. Из расчетов следует, что при угле подхода 15° можно выделить два фактора разогрева материала преграды. Рост температуры происходит за



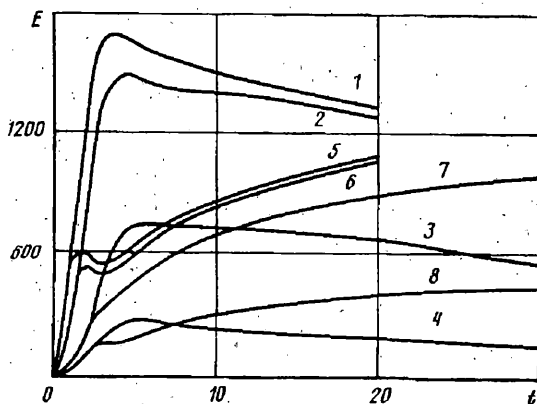
Фиг. 2



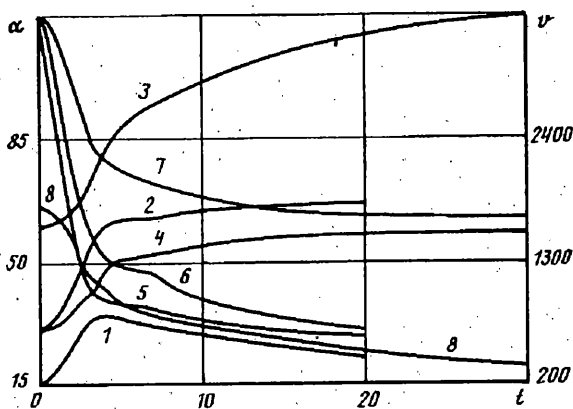
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

счет нагрева, вызванного ударной волной, этот фактор является определяющим в первые несколько микросекунд после начала взаимодействия, а затем возрастание температуры определяется выделением энергии в процессе интенсивного деформирования преграды. Из рисунка видно, что область высоких температур находится в приповерхностном слое, причем если при угле подхода  $15^\circ$  центр области наибольших температур остается на месте, распространяясь с течением времени, то при угле подхода  $60^\circ$  наблюдается смещение центра зоны максимальных температур вдоль лицевой поверхности по ходу движения ударника.

Расчеты показывают, что в обоих случаях в приповерхностном слое пластины возникают области, где температура достигает значения температуры плавления, перемещение центра области плавления по ходу движения ударника при угле подхода  $60^\circ$  свидетельствует об интенсивном деформировании преграды как основном факторе ее разогревания. В целом разогрев преграды при ударе под углом  $15^\circ$  является более значительным, но и при угле подхода  $60^\circ$  значения температуры непосредственно под ударником, на срединной поверхности после 10 мкс превышают 800 К, свидетельствуя о необходимости учета в расчетах температурного  $E$  [кДж/м] фактора.

Динамику изменения энергетических параметров  $E$  [кДж/м] в процессе взаимодействия в широком диапазоне углов встречи иллюстрирует фиг. 5. Кривые 1, 2, 3 описывают изменение кинетической энергии пластины при скорости удара 3500 м/с и углах подхода 15°, 30° и 60° ( $t$  [мкс]). Кривая 4 соответствует скорости 1800 м/с и углу подхода 30°. Кривые 5—8 в аналогичной последовательности представляют зависимость внутренней энергии преграды от времени для тех же параметров. На кривых 5 и 6 наблюдаются характерные участки быстрого роста, а затем падения внутренней энергии преграды, вызванного разгрузкой материала преграды, в котором вследствие ударно-волнового нагружения в первые моменты времени происходит накопление внутренней энергии, обусловленное формированием области высоких давлений.

При угле подхода 60° (кривая 7) зависимость внутренней энергии от времени носит монотонный характер, что говорит о невыраженности ударно-волновых процессов в данном случае. При скорости встречи 1800 м/с и угле подхода 30° (кривая 8) ударно-волновая стадия нагружения, хотя и менее выраженная, чем у кривой 6, соответствующей 3500 м/с и тому же углу встречи, в 30°, но все же имеет место.

Кривые 1 и 2 свидетельствуют, что при углах встречи до 30° и скорости подхода 3500 м/с энергия ударника в первые 4 мкс в основном переходит в кинетическую энергию преграды. В момент достижения кинетической энергией максимального значения она почти в три раза превосходит величину внутренней энергии в преграде. При угле встречи 60° значения кинетической и внутренней энергии в преграде являются близкими друг другу в первые 20 мкс, в последующем значение внутренней энергии продолжает расти, в то время как кинетическая монотонно падает.

В случае скорости удара 1800 м/с величины для кинетической и внутренней энергии имеют наиболее близкие значения, причем значения внутренней энергии уже после 10 мкс превышают соответствующие значения кинетической.

Особенности движения ударника при несимметричном ударе иллюстрируют графики, представленные на фиг. 6. Кривые 1, 2 и 3 представляют изменения угла  $\alpha$  вектора скорости центра масс ударника, взаимодействующего с преградой со скоростью 3500 м/с при углах встречи 15°, 30° и 60°, соответственно. Кривая 4 соответствует скорости встречи 1800 м/с и углу подхода 1800 м/с. Расчеты свидетельствуют, что в первые 4 мкс все эти кривые ведут себя одинаково — вектор угла скорости центра масс монотонно возрастает. Соответствующие указанной выше последовательности параметров кривые 5—8, описывающие изменение скорости центра масс ударников  $v$  [м/с] для тех же параметров взаимодействия показывают, что первой стадии, когда тенденция всех ударников к рикошетированию максимальна, соответствует период наибольшего торможения ударников.

Расчеты показывают, что при угле подхода 60° угол вектора скорости центра масс ударника превышает 90° уже после 7 мкс и в дальнейшем продолжает расти до 120°, что говорит о том, что основная масса ударника, рикошетируя, образует угол разлета 30° от поверхности преграды. Из анализа проведенных расчетов, результаты которых представлены на фиг. 6 следует, что тенденция к рикошетированию возрастает с увеличением угла встречи и уменьшается с уменьшением скорости удара.

Таким образом проведенные исследования показали, что при скоростях удара порядка 3000 м/с и углах встречи до 45° в перфорацию пластин значительный вклад вносят откольные разрушения, возникающие в приповерхностных областях. Из расчетов следует, что значения температур, близкие к температуре плавления стали возникают в преграде уже при скоростях встречи 1800 м/с. Показано, что наиболее характерная особенность разрушения при несимметричном ударе проявляется в сдвиге откольной тарелочки, отделяющейся от тыльной поверхности преграды, относительно кольца отрыва, образующегося на лицевой поверхности. Преобладающая роль ударно-волновых эффектов в формировании приповерхностных разрушений в диапазоне углов встречи до 45° проявляется в осесимметричности формирующихся там зон разрушений. Показано, что при углах встречи больше 60° происходит рикошетирование ударников, а в формировании зон разрушения и плавления основным становится деформационный фактор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горельский В. А., Зелепугин С. А., Хорев И. Е. Исследование влияния температурных эффектов при ударно-волновом нагружении твердых тел // Детонация. Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черногоровка: ОИХФ АН СССР. 1989. С. 82—84. 159—161.
2. Горельский В. А., Зелепугин С. А. Реологические и тепловые эффекты при высокоэнергетическом



- импульсном воздействии на пластину из фторполимера//Реофизика и теплофизика неравновесных систем. Материалы Международной школы-семинара. Часть 2. Минск: ИТМО АН БССР, 1991. С. 110—113.
3. Ефимов А. Б., Зуев В. В., Майборода В. П., Малашкин А. В. Динамическое разрушение защитных преград//Изв. АН СССР. МТТ. 1991. № 3. С. 82—92.
  4. Антуков В. Н., Петрухин Г. И., Поздеев А. А. Оптимальное торможение твердого тела неоднородной пластиной при ударе по нормали//Изв. АН СССР. МТТ. 1985. № 1. С. 165—170.
  5. Wilkins M. L. Mechanics of penetration and perforation//Int. J. Eng. Science. 1978. V. 16. No. 11. P. 793—807.
  6. Хорев И. Е., Горельский В. А. Численное моделирование откольных разрушений при осесимметричном взаимодействии твердых тел//Детонация. Материалы 2 Всесоюзного совещания по детонации. Черноголовка: ОИХФ АН СССР. 1981. С. 149—153.
  7. Глушко А. И. Численное решение задачи соударения цилиндрических пластин с учетом накопления микропор//Изв. АН СССР. МТТ. 1981. № 4. С. 115—124.
  8. Рузанов А. Н. Численное исследование относительной прочности с учетом микроповреждений//Изв. АН СССР. МТТ. 1984. № 5. С. 109—115.
  9. Хорев И. Е., Горельский В. А. Осесимметричный откол в задачах широкодиапазонного взаимодействия твердых тел//Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 623—626.
  10. Дремин А. Н., Хорев И. Е., Горельский В. А., Толкачев В. Ф. Кинетические механизмы лицевого разрушения пластин//Докл. АН СССР. 1986. Т. 290. № 4. С. 848—852.
  11. Tate A. A simple estimate of the minimum target obliquity required for the ricochet of a high speed long rod projectile//J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. V. 12. No. 11. P. 1825—1829.
  12. Johnson W., Sengupta A. K., Ghosh S. K. High velocity oblique impact and ricochet mainly of long projectiles: a overview//Int. J. Mech. Sci. 1982. V. 24. No. 7. P. 425—436.
  13. Киселев А. Б. Численное моделирование рикошета жесткого ударника от упругопластической преграды в трехмерном случае//Механика деформируемых сред. М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 94—98.
  14. Буланцев Г. М., Корнеев А. И., Николаев А. П. О рикошетировании при ударе//Изв. АН СССР. МТТ. 1985. № 2. С. 138—142.
  15. Горельский В. А., Хорев И. Е., Югов Н. Т. Динамика трехмерного процесса несимметричного взаимодействия деформируемых тел с жесткой стенкой//ПМТФ. 1985. № 4. С. 112—118.
  16. Горельский В. А., Хорев И. Е., Югов Н. Т. Особенности разрушения цилиндров при несимметричном взаимодействии с жесткой стенкой//Изв. АН СССР. МТТ. 1986. № 6. С. 135—139.
  17. Johnson G. R. Status of EPIC codes, material characterization and new computing concepts at Honeywell//Lect. Notes Eng. 1983. V. 3. P. 24—35.
  18. Belytschko T., Lin J. I. A three-dimensional impact penetration algorithm with erosion//Comput. and Struct. 1987. V. 25. No. 1. P. 95—104.
  19. Johnson G. R. High velocity impact calculation in three dimensions//J. Appl. Mech. 1977. V. 44. No. 1. P. 95—100.
  20. Горельский В. А., Хорев И. Е., Югов Н. Т. Численное исследование трехмерных задач внедрения и разрушения цилиндров при несимметричном нагружении//Физика горения и взрыва. 1987. № 1. С. 71—74.
  21. Дремин А. Н., Хорев И. Е., Горельский В. А., Югов Н. Т. Численное исследование трехмерных задач разрушения цилиндрических тел в условиях несимметричного динамического контакта//Докл. АН СССР. 1986. Т. 288. № 6. С. 1331—1334.
  22. Хорев И. Е., Горельский В. А., Зелепугин С. А., Толкачев В. Ф. Исследование деформирования и кинетики разрушения контактирующих тел при несимметричном динамическом взаимодействии//Физика горения и взрыва. 1983. № 5. С. 119—123.
  23. Горельский В. А., Зелепугин С. А., Хорев И. Е. Особенности разрушения пластины при внедрении в нее двух сходящихся частиц//IV Всесоюзное совещание по детонации. Доклады. Т. 2. Черноголовка: ОИХФ АН СССР. 1988. С. 160—165.
  24. Хорев И. Е., Горельский В. А., Зелепугин С. А. Исследование релаксационных эффектов в пластине при синхронном контактировании с ней двух частиц//Прикл. механика. 1989. Т. 25. № 6. С. 42—48.
  25. Brown W. T. Numerical modeling of oblique hypervelocity impact using two-dimensional plane strain models//Shock waves condens. matter. conf. Menlo Park, Calif., 23—25 June 1981, 1982. P. 529—533.

26. *Seaman L., Curran D. R., Shokey D. A.* Computational models for ductile and brittle fracture//J. Appl. Phys. 1976. V. 47. No. 11. P. 4814—4826.
27. *Канель Г. И., Щербань В. В.* Пластическая деформация и откольное разрушение железа «армко» в ударной волне//Физика горения и взрыва. 1980. Т. 5. № 4. С. 93—103.
28. *Альтшулер Л. В.* Применение ударных волн в физике высоких давлений//УФН. 1965. Т. 85. № 2. С. 197—258.
29. *Gust W. H.* High impact deformation of metal cylinder at elevate temperatures//J. Appl. Phys. 1982. V. 53. No. 5. P. 3566—3575.

Томск

Поступила в редакцию  
19.V.1992