

УДК 539.374

УДАР ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ИНДЕНТОРА
ПО ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПЛИТЕ С ПОЛОСТЯМИ

РИМСКИЙ В. К.

В [1, 2] рассматривалось нормальное соударение вращающегося цилиндра с термовязкоупругой или упругопластической плитой, содержащей цилиндрические полости. На основе систематического анализа результатов вычислительных экспериментов, проведенных с помощью сеточно-характеристической схемы, детально исследовалось распределение напряжений, температуры, остаточных деформаций в ударнике и преграде, а также оценивалось влияние физико-механических свойств материалов, ослабляющих и других факторов на эволюцию параметров волновых полей.

Публикуемая работа посвящена численному моделированию нестационарных термоупругопластических процессов, инициированных контактным взаимодействием осесимметричных или прямоугольных тел.

Приводятся определяющие соотношения связанной теории термоупругопластичности, основанные на концепции «единой кривой» [3], и для их численного интегрирования строится итерационная разностная схема сквозного счета. Анализ числовой информации позволил выявить основные закономерности напряженного и кинематического состояния многослойной плиты с полостями при ударе деформируемого индентора в форме цилиндра переменного радиуса или прямоугольного бруса.

1. Рассмотрим динамическое поведение термоупругопластической среды, для которой зададим определяющие соотношения при активном нагружении ($\sigma_i > 0$) в виде

$$\begin{aligned} \sigma^* &= 3K(\varepsilon^* - 3\alpha T^*) \quad s_{ij}^* = 2\mu_* e_{ij}^* + \mu_*^* / \mu_* s_{ij}^* \\ cT^* &= \text{div}(k \text{ grad } T) - pT\dot{\varepsilon}^* + W_* + P, \quad W_* = \sigma_i(e_i^* - 1/3\sigma_i^* / \mu) \\ \mu_* &= 1/3\sigma_i / e_i, \quad p = 3K\alpha, \quad K = \lambda + 2/3\mu \end{aligned}$$

Данные зависимости, выписанные в цилиндрических координатах r, z, φ с учетом осевой симметрии и дополненные тремя уравнениями движения, эквивалентны следующим:

$$\begin{aligned} \rho u^* &= \partial\sigma_r / \partial r + \partial\sigma_{rz} / \partial z + (\sigma_r - \sigma_\varphi) / r \\ \rho v^* &= \partial\sigma_{rz} / \partial r + \partial\sigma_z / \partial z + \sigma_{rz} / r \\ \rho w^* &= \partial\sigma_{r\varphi} / \partial r + \partial\sigma_{z\varphi} / \partial z + 2\sigma_{r\varphi} / r \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\sigma_{r\varphi, z}^* = 2\mu_* \varepsilon_{\varphi, z}^* + \mu_*^* / \mu_* \sigma_{r\varphi, z}^*$$

$$\sigma_{r, \varphi, z}^* = \lambda_* \varepsilon^* + 2\mu_* \varepsilon_{r, \varphi, z}^* - pT^* + \mu_*^* / \mu_* (\sigma_{r, \varphi, z} - \sigma / 3)$$

$$cT^* = k(\partial^2 T / \partial r^2 + 1/r \partial T / \partial r + \partial^2 T / \partial z^2) - pT\dot{\varepsilon}^* + W_* + P$$

$$\varepsilon_r^* = \partial u / \partial r, \quad \varepsilon_\varphi^* = u / r, \quad \varepsilon_z^* = \partial v / \partial z$$

$$\varepsilon_{r\varphi}^* = 1/2(\partial w / \partial r - w / r), \quad \varepsilon_{z\varphi}^* = 1/2 \partial w / \partial z$$

$$\varepsilon_{rz}^* = 1/2(\partial v / \partial r + \partial u / \partial z), \quad \varepsilon^* = \varepsilon_r^* + \varepsilon_\varphi^* + \varepsilon_z^*$$

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z, \quad \lambda_* = \lambda + 2/3(\mu - \mu_*)$$

В прямоугольных декартовых координатах x, y, z полная система пространственно трехмерных уравнений, содержащая в качестве неизвестных

скорости перемещений, напряжения и температуру, такова:

$$\begin{aligned} \rho \dot{u} &= \partial \sigma_x / \partial x + \partial \sigma_{xy} / \partial y + \partial \sigma_{xz} / \partial z & (1.2) \\ \rho \dot{v} &= \partial \sigma_{xy} / \partial x + \partial \sigma_y / \partial y + \partial \sigma_{yz} / \partial z, \quad \rho \dot{w} = \partial \sigma_{xz} / \partial x + \partial \sigma_{yz} / \partial y + \partial \sigma_z / \partial z \\ \sigma_{x,y,z} &= \lambda_* \dot{\varepsilon} + 2\mu_* \dot{\varepsilon}_{x,y,z} - pT^* + \mu_* / \mu_* (\sigma_{x,y,z} - \sigma / 3) \\ \sigma_{xy,xz,yz} &= 2\mu_* \dot{\varepsilon}_{xy,xz,yz} + \mu_* / \mu_* \sigma_{xy,xz,yz} \\ cT^* &= k(\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) - pT \dot{\varepsilon} + W_* + P \\ \varepsilon_x &= \partial u / \partial x, \quad \varepsilon_y = \partial v / \partial y, \quad \varepsilon_z = \partial w / \partial z \\ \varepsilon_{xy} &= (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x) / 2, \quad \varepsilon_{xz} = (\partial u / \partial z + \partial w / \partial x) / 2 \\ \varepsilon_{yz} &= (\partial v / \partial z + \partial w / \partial y) / 2 \end{aligned}$$

В уравнении теплопроводности P — известное распределение плотности внутренних источников тепла, а функция рассеивания энергии W_* зависит от уровня достигнутого напряженного состояния [4]. Кривую динамического деформирования $\sigma_i \sim \varepsilon_i$, которая определяется для каждого материала экспериментальным путем, будем считать заданной.

При разгрузке $\sigma_i \leq 0$ пластический модуль сдвига в исходных уравнениях следует заменить на упругий ($\mu_* = \mu$).

В рамках используемой теории термоупругопластичности рассматриваются осесимметричная и трехмерная задачи об ударе цилиндра переменного радиуса или прямоугольного бруса по многослойной плите с полостями. Формулировка краевых и начальных условий традиционна [2]. Соударяемые тела свободны от внешних напряжений, а для индентора в начальный момент времени $t=0$ задается скорость удара. На границах соединения разнородных материалов, входящих в состав слоистой преграды, искомые функции удовлетворяют условиям идеального термомеханического контакта. Стенки полостей свободны от напряжений. На круговой или прямоугольной площадках контакта ударника и плиты выполняются условия гладкого удара.

2. Численное решение квазилинейных систем дифференциальных уравнений (1.1), (1.2) при заданных граничных и начальных условиях осуществляется с помощью явной схемы, основанной на сеточно-характеристическом подходе [2, 5, 6]. Принцип построения разностных уравнений, аппроксимирующих осесимметричную задачу, изложен в [2]. Дискретное представление трехмерной задачи термоупругопластичности на сетке с шагами τ , h_{xi} , h_{yj} , h_{zm} можно получить аналогичным способом [1, 2, 6]. Приведем разностную аппроксимацию первого и четвертого уравнений системы (1.2):

$$\begin{aligned} u_{i-1/2,j-1/2,m-1/2}^{n+1} &= u_{i-1/2,j-1/2,m-1/2}^n + \tau [(\sum_{xi}^{n+1/2} \sigma_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2} - \sum_{xi-1,j-1/2,m-1/2}^n) / h_{xi} + \\ &+ (\sum_{xy}^{n+1/2} \sigma_{xyi-1/2,j,m-1/2} - \sum_{xyi-1/2,j-1,m-1/2}^n) / h_{yj} + \\ &+ (\sum_{xz}^{n+1/2} \sigma_{xzi-1/2,j-1/2,m} - \sum_{xzi-1/2,j-1/2,m-1}^n) / h_{zm}] / \rho_{i-1/2,j-1/2,m-1/2} \\ \sigma_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^{n+1} &= \sigma_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^n + \tau (\lambda_*^{n+1} \mu_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^{n+1} + 2\mu_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^{n+1}) \times \\ &\times (U_{i,j-1/2,m-1/2}^{n+1/2} - U_{i-1,j-1/2,m-1/2}^{n+1/2}) / h_{xi} + \tau \lambda_*^{n+1} \mu_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^{n+1} \times \\ &\times [(V_{i-1/2,j,m-1/2}^{n+1/2} - V_{i-1/2,j-1,m-1/2}^{n+1/2}) / h_{yj} + (W_{i-1/2,j-1/2,m}^{n+1/2} - W_{i-1/2,j-1/2,m-1}^{n+1/2}) / h_{zm}] - \\ &- p_{i-1/2,j-1/2,m-1/2} (T_{i-1/2,j-1/2,m-1/2}^{n+1} - T_{i-1/2,j-1/2,m-1/2}^n) - (1 - \mu_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^n / \\ &/ \mu_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^{n+1}) (\sigma_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^n - \sigma_{xi-1/2,j-1/2,m-1/2}^n / 3) \end{aligned}$$

Вспомогательные «большие» величины U , V , W , Σ , определенные в точках границ прямоугольных ячеек, на которые разбивается область интегрирования, вычисляются с помощью покоординатного расщепления пространственно трехмерных уравнений (1.2) и использования римановых инвариантов. Корректировка модуля пластического сдвига μ_* , нелинейно зависящего от решения, на каждом временном шаге проводится методом последовательных приближений [2].

При доказательстве устойчивости построенной разностной схемы, обладающей первым порядком аппроксимации, оператор перехода представляется в виде

$$H = I + \tau(H_x + H_y + H_z) = (1 - \tau/\tau_x - \tau/\tau_y - \tau/\tau_z)I + \\ + \tau(I + \tau_x H_x)/\tau_x + \tau(I + \tau_y H_y)/\tau_y + \tau(I + \tau_z H_z)/\tau_z$$

где I — единичный (тождественный) оператор, H_x , H_y , H_z — операторы, содержащие разностные производные только по пространственным переменным x , y , z ; τ_x , τ_y , τ_z — шаги по времени «одномерных» схем, отвечающих операторам $I + \tau_x H_x$, $I + \tau_y H_y$, $I + \tau_z H_z$.

Проделав, как и в [6], выкладки по оценке норм операторов, получим достаточное условие устойчивости

$$\tau a_{i-1/2, j-1/2, m-1/2} (1/h_{xi} + 1/h_{yj} + 1/h_{zm}) \leq 1 \\ a = \sqrt{\lambda + 2\mu/\rho}$$

Исходную контактную задачу удобно представить в безразмерной форме, где линейные размеры относятся к толщине преграды h ; время t нормируется относительно h/a ($a = 6320$ м/с — скорость звука в алюминии); напряжения разделены на ρa^2 , скорость перемещений — на a . Температура обезразмеривалась по формуле $T = (T^\circ - T_0^\circ)/T_0^\circ$ (градусом отмечены размерные величины, $T_0^\circ = 300$ К).

Разностная схема для осесимметричных уравнений реализована на двумерной сетке 80×81 при следующих значениях исходных данных: $h_x = h_z = 2\tau = 0,025$. $P = 0$, $V_0 = 0,0475 - 0,0079$ (300–50 м/с в реальном масштабе). Расчеты проводились для двух- и трехслойных плит, составленных из алюминия (Al) и железа (Fe), диаграммы деформирования которых принимались билинейными (Al: $\sigma_s = 0,3$ ГПа, $e_s = 0,38\%$, $E_1 = 0,05$ Э = 3,5 ГПа; Fe: $\sigma_s = 0,44$ ГПа, $e_s = 0,19\%$, $E_1 = 0,0074$ Э = 1,47 ГПа).

Изучение динамической реакции взаимодействующих образцов (элементов конструкций) проводилось в широком диапазоне изменения основных параметров (скорость удара, физико-механические свойства и геометрические особенности ударника и мишени), определяющих характер деформирования материалов при ударном нагружении. Расчетам предшествовал анализ влияния числа узлов интегрирования на результаты вычислительного эксперимента. Шаги по пространственно-временным координатам выбирались таким образом, чтобы их размеры были оптимальными с точки зрения достижения приемлемой точности дискретных решений при минимальных затратах машинного времени и используемой оперативной памяти ЭВМ. При уменьшении шагов сетки получались достаточно близкие результаты, что может служить практически полным доказательством сходимости и единственности решения поставленной задачи. Контроль вычислений осуществляется также при соблюдении баланса полной термомеханической энергии, разностная диссипация которой на интервале времени $0 < t < 6,0$ не превышала 7%.

Рассмотрим вначале осесимметричное контактное взаимодействие сплошного (полого) цилиндра постоянного радиуса с жесткой или деформируемой преградой. В табл. 1 приведены значения максимального приращения температуры на площадке контакта различных пар соударяемых образцов, а также относительное изменение их линейных размеров вдоль оси симметрии в результате пластического деформирования материалов к моменту $t = 6$ (h_0 — начальная длина цилиндра, h — толщина плиты). Варианты $N = 16, 17$ относятся к случаю удара индентора по плите с полостями или жесткими включениями. Внешний радиус цилиндра обозначен нижним индексом, верхний — относится к внутреннему радиусу полого цилиндра, а множитель перед обозначением металла соответствует его толщине (B — тип ударника-плиты, A — абсолютно жесткая преграда).

Из представленных в табл. 1 результатов следует независимость отношения $\Delta h_0/h_0$ от радиуса цилиндра при его столкновении с абсолютно твердым препятствием, что подтверждает выводы из [7], где указанная закономерность используется при проведении вычислительных экспериментов с целью определения динамического предела текучести металлов. Уменьшение площади поперечного сечения бойка сопровождается некоторым повышением приращения температуры на ударяющем торце.

Фактор деформируемости преграды и содержание в ней ослабляющих полостей или жестких включений существенно сказываются на всех вычисляемых характе-

Таблица 1

N	B	ΔT , К	$\Delta h_0/h_0$, %	$\Delta h/h$, %
$V_0=300$ м/с				
1	$Fe_{0,5} \rightarrow A$	111,5	-23,6	0
2	$Fe_{0,25} \rightarrow A$	132,6	-23,2	0
3	$Fe_{0,125} \rightarrow A$	138,8	-23,2	0
4	$Fe_{0,5}^{0,375} \rightarrow A$	121,2	-22,5	0
5	$Al_{0,5} \rightarrow A$	93,2	-20,9	0
6	$Al_{0,25} \rightarrow A$	103,8	-20,8	0
7	$Al_{0,125} \rightarrow A$	147,6	-20,7	0
8	$Fe_{0,5} \rightarrow Al$	66,2	-13,7	-7,3
9	$Fe_{0,125} \rightarrow Al$	102,9	-16,8	-7,3
10	$Fe_{0,125} \rightarrow Fe$	125,4	-22,5	-2,1
11	$Fe_{0,5} \rightarrow Fe$	86,7	-16,6	-4,0
12	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Al - 0,5Fe$	73,0	-9,8	-10,1
13	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Fe - 0,5Al$	77,1	-15,0	-3,1
14	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,4Fe - 0,2Al - 0,4Fe$	87,0	-15,6	-4,3
15	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,4Al - 0,2Fe - 0,4Al$	75,1	-10,4	-9,6
16	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Al - 0,5Fe^*$	48,9	-5,2	-0,4
17	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Al - 0,5Fe^{**}$	77,4	-10,7	-13,0
$V_0=100$ м/с				
18	$Fe_{0,5} \rightarrow A$	28,4	-5,7	0
19	$Fe_{0,25} \rightarrow A$	35,7	-5,7	0
20	$Fe_{0,125} \rightarrow A$	36,6	-5,7	0
21	$Fe_{0,5}^{0,375} \rightarrow A$	32,7	-5,2	0
22	$Fe_{0,5} \rightarrow Al$	13,2	-1,9	-2,2
23	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Al - 0,5Fe$	18,9	-2,7	-2,5
24	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Fe - 0,5Al$	21,6	-4,0	-1,0
$V_0=50$ м/с				
25	$Fe_{0,5} \rightarrow Al$	6,15	-0,4	-0,6
26	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Al - 0,5Fe$	6,30	-0,7	-0,8
27	$Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Fe - 0,5Fe$	7,02	-1,1	-0,3

ристик, в том числе и на конечной длине пластически сдформированного цилиндра.

Отношение $\Delta h/h$, характеризующее максимальную глубину остаточной вмятины (кратера) в плите, с уменьшением радиуса ударяемого цилиндра остается без изменений для пары $Fe \rightarrow Al$, в то время как при соударении однородных образцов — уменьшается. При наличии в преграде включений $\Delta h/h$ принимает наибольшее значение среди рассмотренных случаев, а когда имеются свободные полости, то глубина кратера минимальна.

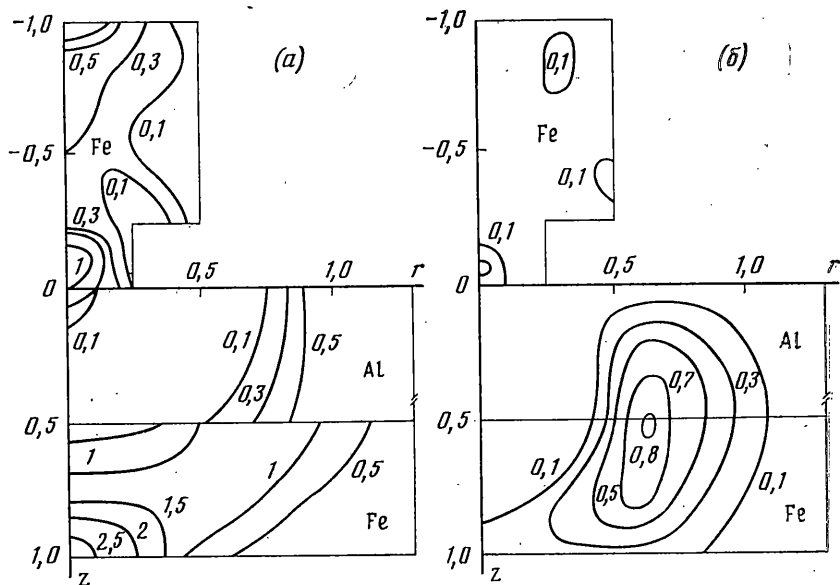
Сопоставление результатов расчетов для различных скоростей удара обнаруживает нелинейную зависимость характеристик волновых полей от параметра V_0 .

Для исследования напряженного состояния соударяемых тел в стадии растяжения и выявления в них зон возможных разрушений на фиг. 1 представлены изолинии импульсов положительных напряжений ($0 \leq \tau \leq t$), $I_r(r, z) = \int \sigma_r d\tau$ (а) и $I_z(r, z) = \int \sigma_z d\tau$ (б), соответствующих $V_0=300$ м/с и $t=6$. Линии уровня нормируются относительно множителя 10^{-4} .

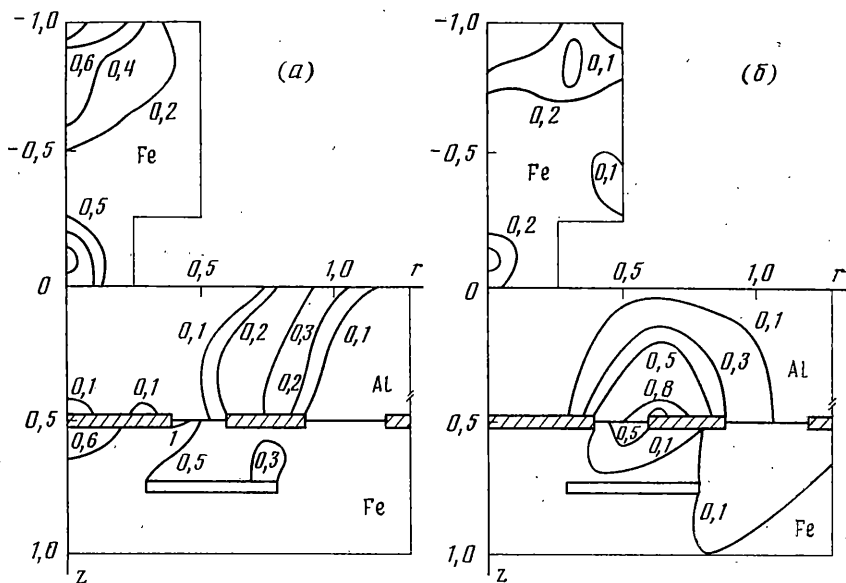
Анализ покоординатного распределения импульса растягивающих напряжений, действующих на площадках, параллельных оси z , показывает, что максимальные значения I_r сформировались в окрестности тыльной поверхности железной подложки, где вероятнее всего начнется развитие трещин вертикальной ориентации. В цилиндрическом ударнике, радиус которого переменный, локальное повышение уровня I_r наблюдается в центральной части вблизи торцовых сечений.

Исходя из структуры кривых $I_r(r, z) = \text{const}$ можно заметить существование в биметаллической преграде лишь одного максимума, расположенного в точках поверхности раздела разнородных слоев на расстоянии 0,65 от оси симметрии (фиг. 1, б). Очевидно, что отслоение откольной пластины будет происходить по плоскости с максимумом повреждений. Этот факт дает основание прогнозировать месторасположение и конфигурацию наиболее опасной зоны, в которой развиваются критические напряжения, непосредственно предшествующие расслоению неоднородного пакета в процессе ударного нагружения.

Следует также указать на то, что координаты экстремальных точек функций I_r и I_z не совпадают на всем рассматриваемом интервале времени. Таким образом, зарождение разрывов сплошности материала может происходить одновременно в нескольких областях как плиты, так и ударника. Причем несплошности могут иметь существенно различную конфигурацию и отличаться не только формой, но и размерами.



Фиг. 1

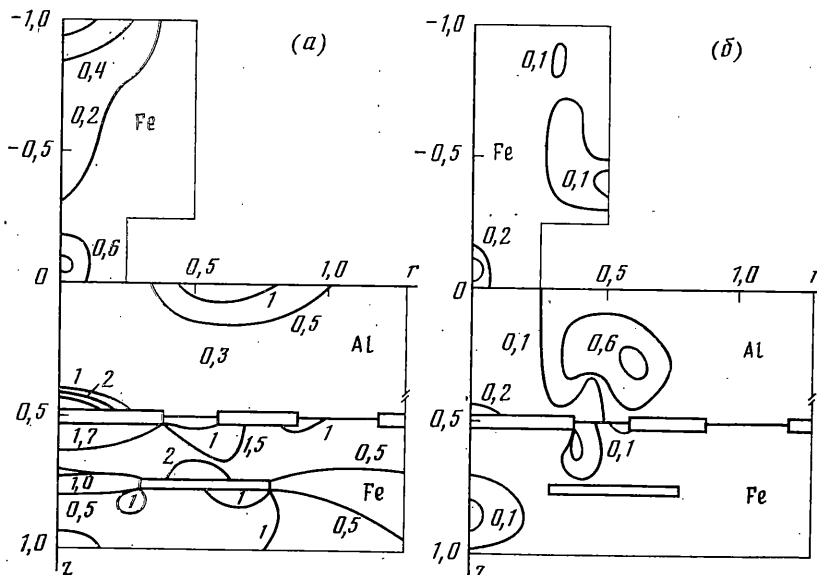


Фиг. 2

Поведение линий равных значений I_r и I_z в плите с включениями и полостями (фиг. 2) носит качественно и количественно иной характер, чем в сплошной механической системе. Взаимодействие прямых волн сжатия со стенками недеформируемых включений, расположенных на контактной границе Al-Fe, приводит к увеличению в ударнике максимумов I_r и I_z в полтора раза. Зоны повышенных значений растягивающих напряжений в плите формируются теперь вблизи угловых точек первых двух включений. Максимум I_r по сравнению со сплошной преградой снизился до 1,0 и сместился к контактной поверхности Al-Fe; пиковые значения I_z увеличились на 25%, а их координаты не изменились.

Наличие в плите жестких включений приводит к такому перераспределению энергии удара, что растягивающие напряжения в окрестности тыльной (свободной) поверхности $z=1,0$ практически отсутствуют, чего нельзя сказать о преграде со свободными полостями, имитирующими пустотелые дефекты (фиг. 3). В этом случае характерной особенностью является ослабление действия напряжений в цилиндре и образование в плите нескольких локальных экстремумов, при этом максимальное амплитудное значение I_r принимает в граничных точках первой полости, откуда может начаться процесс разрушения плиты с образованием вертикальных трещин.

В результате суперпозиции волн и их взаимодействия со свободными стенками полостей в областях, прилегающих к лицевой и тыльной поверхностям сплошной преграды, образуются зоны концентрации напряжений, инициирующих комплекс-



Фиг. 3

откольных явлений, сопровождающихся накоплением микротрещин и микропор. Этот результат можно интерпретировать как возможность множественного (двойного) откола.

В табл. 2 помимо значений для величин ΔT , $\Delta h_0/h_0$, $\Delta h/h$ представлены результаты вычислений максимума импульсов растягивающих напряжений, возникающих в двухслойной плите ($0,5Al-0,5Fe$) при ударе цилиндра с переменным поперечным сечением, за исключением вариантов 1 (плоское соударение неограниченных по r образцов: $Fe_{\infty} \rightarrow 0,5Al-0,5Fe$) и 2 (удар цилиндра по однородной плите: $Fe_{0,5/0,25} \rightarrow Al$). Остальные варианты соответствуют удару цилиндра по сплошной преграде (вариант 3) и преграде с жесткими включениями (вариант 4) или свободными полостями (вариант 5). Вариант 6 рассчитан для композиции варианта 5 по упругой модели ($\mu_* = \mu$).

Представленная здесь числовая информация наглядно иллюстрирует влияние как геометрических, так и реологических факторов на характеристики ударно-волновых процессов. Если, например, не учитывать пластические свойства материалов, то значения I_{rm} , I_{zm} окажутся завышенными в несколько раз. Наличие полостей в плите, имитирующих начальные несовершенства слоистого пакета, сложным образом влияет на формирование волновой картины и конечные значения линейных размеров пластически деформируемых тел. В варианте 1 (плоское соударение пластин равной толщины) максимум I_z достигается при $z_* = 0,72$. Очевидно, что распространение откольного импульса будет происходить вдоль плоскости с указанной координатой и толщина пластины, отделившейся от двухслойной плиты-мишени, составит 0,28.

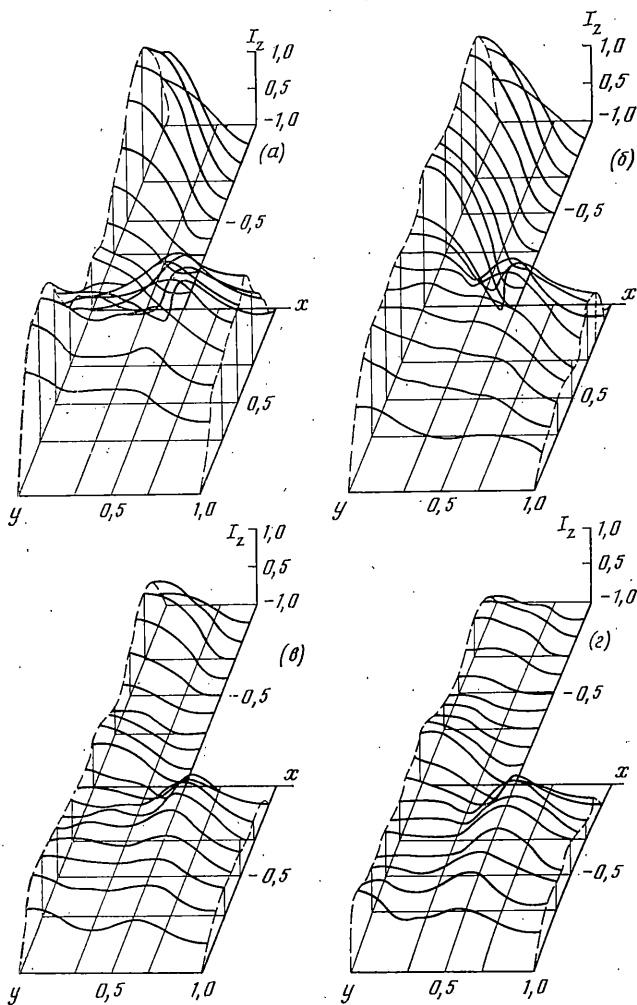
На фиг. 4 в точках плоскости xy при $z=0$ показаны значения I_z для случая нормального соударения прямоугольного бруса ($-0,5 < x, z < 0,5$; $-0,1 < y < 0$) с однородными или биметаллическими плитами: а - $Fe_{0,5} \rightarrow Fe$; б - $Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Fe-0,5Al$; в - $Fe_{0,5} \rightarrow Al$; г - $Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Al-0,5Fe$.

Численное решение пространственно трехмерной задачи получено на сетке $10 \times 20 \times 10$ для ударника и $30 \times 20 \times 30$ для плиты, причем использовалась симметрия волнового поля относительно плоскостей $x=0$ и $z=0$. Число узлов разностной сетки является близким к предельному с точки зрения возможностей современных ЭВМ серии ЕС.

Пространственное распределение импульсов растягивающих напряжений дает наглядное представление о конфигурации областей, в точках которых начнется процесс откольного разрушения. При контактном взаимодействии однородных образцов,

Таблица 2

N	ΔT , К	$\Delta h_0/h_0$, %	$\Delta h/h$, %	I_{rm}	I_{zm}
1	75,0	-5,7	-11,0	1,29	3,73
2	140,1	-21,1	-4,9	2,85	0,75
3	98,7	-13,1	-13,3	2,50	0,81
4	99,4	-13,6	-11,4	1,34	1,09
5	73,8	-9,6	-3,7	2,68	0,65
6	26,6	0	0	31,50	3,02



Фиг. 4

а также для пары $Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Fe - 0,5Al$ увеличивается возможность появления горизонтальных разрывов сплошности не только вблизи свободных границ, но и в окрестности прямоугольной площадки соударения.

Из сравнительного анализа представленных результатов вытекает, что самый низкий уровень интегральной характеристики, отвечающей за появление откольных разрушений, имеет место в механической системе $Fe_{0,5} \rightarrow 0,5Al - 0,5Fe$. Даже в железной подложке, где предельно допустимое значение I_z выше, чем у алюминия, функция I_z принимает меньшие значения по сравнению с однородной алюминиевой плитой единичной толщины (фиг. 4, в).

Очевидно, что несущая способность двухслойной преграды, у которой экранирующий слой (покрытие) выполнен из менее жесткого материала, оказывается выше, чем при обратном расположении слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Римский В. Г. Соударение деформируемого штампа с многослойной плитой, ослабленной цилиндрической полостью. — Прикл. механика, 1985, т. 21, № 2, с. 12–19.
2. Римский В. К. Поперечный удар вращающимся цилиндром по многослойной упругопластической плите с полостями. — Изв. АН СССР. МТТ, 1984, № 5, с. 77–84.
3. Ильюшин А. А. Пластичность. М.; Л.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
4. Победра Б. Е. О связанных задачах механики сплошной среды. — Упругость и неупругость: Сб. статей. М.: Изд-во МГУ, 1971, вып. 2, с. 224–253.
5. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
6. Навал И. К., Пацюк В. И., Римский В. К. Нестационарные волны в деформируемых средах. Кишинев: Штиинца, 1986. 236 с.
7. Уилькинс М. Л., Гуинан М. У. Удар цилиндра по жесткой преграде. — Механика. Период. сб. перев. иностр. статей, 1973, № 3, с. 112–128.

Кишинев

Поступила в редакцию
17.IV.1985