

УДК 539.3

© 1994 г. А. Г. ГОРШКОВ, А. А. ДЕРГАЧЕВ

### РАСЧЕТ ПОЛОГОЙ ПАНЕЛИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Достаточно широкий класс конструкций, работающих в условиях воздействия высокоинтенсивных потоков энергии, может быть описан моделью панели малой кривизны. В публикуемой работе рассматривается воздействие импульса электромагнитного излучения на прямоугольную пологую панель с учетом фазовых переходов плавления и испарения, неупругости поведения материала, зависимости теплофизических и механических характеристик от температуры.

При допущении о равномерном нагреве панели по площади и малости прогибов уравнения движения могут быть записаны в виде

$$D \nabla^2 \nabla^2 w = p + \frac{h}{R_2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{h}{R_1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 M_T}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 M_T}{\partial y^2} - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 M_x^\circ}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 M_y^\circ}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}^\circ}{\partial x \partial y} - \frac{N_x^\circ}{R_1} - \frac{N_y^\circ}{R_2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{B} \nabla^2 \nabla^2 \varphi = \frac{1 - \nu^2}{h} \left( \frac{1}{R_1} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{R_2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - (1 - \nu) \frac{1}{h} \nabla^2 \left( \frac{N_T}{B} \right)$$

$$D = \frac{1}{1 - \nu^2} \int_{-h/2}^{h/2} E(T) (z - z_0)^2 dz, \quad B = \frac{1}{1 - \nu^2} \int_{-h/2}^{h/2} E(T) dz$$

$$N_T = \frac{1}{1 - \nu} \int_{-h/2}^{h/2} E(T) \alpha(T) T dz, \quad M_T = \frac{1}{1 - \nu} \int_{-h/2}^{h/2} E(T) \alpha(T) T (z - z_0) dz$$

где  $\varphi$  — функция напряжений;  $R_1, R_2$  — радиусы кривизны;  $w$  — прогиб панели по нормали;  $p$  — давление, действующее на панель;  $M_x^\circ, M_y^\circ, M_{xy}^\circ, N_x^\circ, N_y^\circ$  — поправки на неупругость работы материала.

Полученная система уравнений дополняется соответствующими начальными и граничными условиями.

Температура определяется при допущении об одномерном распространении тепла по толщине пластины. Уравнения теплопроводности для твердой и жидкой фазы записываются следующим образом:

$$\rho_{s(l)} C_{vs(l)} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{s(l)} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность,  $C_v$  — коэффициент удельной массовой теплоемкости при по-

стоянном объеме,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $T$  — температура, индексы  $s$  и  $f$  обозначают твердую и жидкую фазу соответственно. Уравнения (2) дополняются начальными и граничными условиями, на границе раздела твердой и жидкой фазы [1]. В задаче учитывается конвективное испарение жидкой фазы, расчет производится по модели быстрого поверхностного испарения при наличии притока давления [1].

Задача решается при малых упругопластических деформациях. Напряжения в расчетной точке представляются в виде

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_x^m - \sigma_x^{m^0} + \sigma_x^n - \sigma_x^{n^0}, \quad \sigma_y = \sigma_y^m - \sigma_y^{m^0} + \sigma_y^n - \sigma_y^{n^0} \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^m - \tau_{xy}^{m^0} + \tau_{xy}^n - \tau_{xy}^{n^0}\end{aligned}\quad (3)$$

где  $\sigma_x^m, \sigma_y^m, \tau_{xy}^m$  — напряжения, вызванные моментной нагрузкой и распределенные по сечению по линейному закону;  $\sigma_x^n, \sigma_y^n, \tau_{xy}^n$  — напряжения, вызванные силовыми нагрузками и определяемые по упругому закону;  $\sigma_x^{m^0}, \sigma_y^{m^0}, \tau_{xy}^{m^0}$  и  $\sigma_x^{n^0}, \sigma_y^{n^0}, \tau_{xy}^{n^0}$  — поправки на неупругость работы материала от моментных и силовых факторов нагружения.

Пластичность учитывается по модели Губера—Мизеса. Интенсивность напряжений вычисляется по формуле

$$\sigma_i^e = [(\sigma_x^e)^2 + (\sigma_y^e)^2 - \sigma_x^e \sigma_y^e + 3(\tau_{xy}^e)^2]^{1/2}\quad (4)$$

где упругие компоненты напряжений рассчитываются с использованием следующих зависимостей:

$$\begin{aligned}\sigma_x^e &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[ \varepsilon_x + \nu \varepsilon_y - z \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - (1+\nu) \alpha T \right], \\ \sigma_y^e &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[ \varepsilon_y + \nu \varepsilon_x - z \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - (1+\nu) \alpha T \right], \\ \tau_{xy}^e &= \frac{E}{2(1+\nu)} \left[ -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \gamma_{xy} \right], \quad \varepsilon_x = \frac{h}{B(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{h}{B(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right), \quad \gamma_{xy} = -\frac{2h}{B(1-\nu)} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}\end{aligned}$$

Определение поправок напряжений на неупругость работы материала  $\sigma_x^0 = \sigma_x^{m^0} + \sigma_x^{n^0}$ ,  $\sigma_y^0 = \sigma_y^{m^0} + \sigma_y^{n^0}$ ,  $\tau_{xy}^0 = \tau_{xy}^{m^0} + \tau_{xy}^{n^0}$ , производится как в [1].

Поправки на неупругость работы материала для усилий определяются следующим образом:

$$N_x^0 = \int_0^{h_T} \sigma_x^{n^0} dz, \quad N_y^0 = \int_0^{h_T} \sigma_y^{n^0} dz, \quad N_{xy}^0 = \int_0^{h_T} \tau_{xy}^{n^0} dz\quad (5)$$

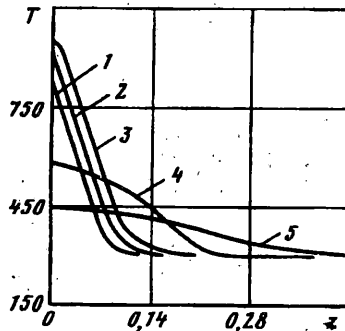
где  $h_T$  — текущая толщина панели.

Значения поправок для моментов определяются из выражений

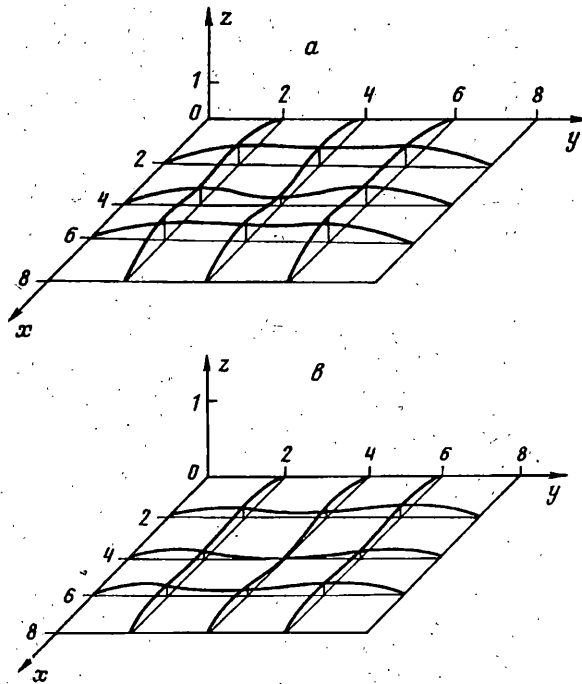
$$M_x^0 = \int_0^{h_T} (z - c_h) (\sigma_x^0 - \sigma_x^{n^0}) dz\quad (6)$$

$$M_y^0 = \int_0^{h_T} (z - c_h) (\sigma_y^0 - \sigma_y^{n^0}) dz, \quad M_{xy}^0 = \int_0^{h_T} (z - c_h) (\tau_{xy}^0 - \tau_{xy}^{n^0}) dz$$

Критерием разрушения является достижение величиной интенсивности напряжений предела текучести в окрестности нейтрального слоя.



Фиг. 1



Фиг. 2

Задача решается методом конечных разностей в явном виде. Алгоритм реализован на языке BASIC.

В качестве примера рассмотрено воздействие импульсного теплового потока интенсивностью  $q = 1,8 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup> и длительностью  $\tau_p = 4 \cdot 10^{-5}$  с ( $p=0$ ) на прямоугольную цилиндрическую панель с размерами  $a=b=0,08$  м,  $h_0=1$  мм и радиусом кривизны  $R_1=5$  м. Панель выполнена из алюминиевого сплава Д19Т и имеет шарнирное опирание. Импульс прямоугольной формы; начальные условия нулевые.

При моделировании приняты следующие шаги интегрирования:  $\Delta t = 2 \cdot 10^{-6}$  с,  $\Delta x = \Delta y = 0,01$  м,  $\Delta z = 7 \cdot 10^{-5}$  м.

На фиг. 1 представлены графики температуры (Т, К) для следующих моментов времени: 1 —  $0,25 \cdot 10^{-4}$  с, 2 —  $0,35 \cdot 10^{-4}$  с, 3 —  $0,45 \cdot 10^{-4}$  с, 4 —  $0,65 \cdot 10^{-4}$  с, 5 —  $1,45 \cdot 10^{-4}$  с. На поверхности панели материал достигает температуры плавления, глубина проплавления составляет 0,013 мм.

На фиг. 2 *a, в* представлены формы деформированной поверхности панели в моменты времени  $t = 0,85 \cdot 10^{-4}$  с и  $t = 1,45 \cdot 10^{-4}$  с соответственно (размеры по осям  $x$  и  $y$  в см). В момент времени  $t = 1,45 \cdot 10^{-4}$  с происходит разрушение панели при образовании пластического шарнира в ее центре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков А. Г., Дергачев А. А. Динамическая задача термоупругости с фазовыми переходами для ортотропной пластины // Изв. АН СССР. МТТ. 1990. № 6. С. 169—172.

Москва

Поступила в редакцию  
4.1.1994