

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ПЛАСТИНОК ПРИ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ И. Н., СКУРЛАТОВ Э. Д.

Известно, что ослабленные отверстиями тонкостенные конструкции широко используются в практике. В одних случаях перфорация необходима из конструктивных соображений, в других — отверстия являются результатом взаимодействия стенки конструкции с высокоскоростным потоком твердых частиц, например с потоком мелких метеоритов или со сверхзвуковым потоком газа [4]. Имеющие ослабляющие отверстия пластинки и оболочки могут подвергаться воздействию как статических, так и динамических нагрузок.

В настоящее время имеется значительное число теоретических исследований, посвященных рассматриваемой проблеме [2, 3], однако мало экспериментальных работ [4], особенно по разрушению тонкостенных перфорированных конструкций при статических нагрузках и динамическому поведению пластинок и оболочек при изменяющейся во времени нагрузке¹.

В публикуемой работе излагаются результаты экспериментального исследования поведения круглых перфорированных пластинок при действии прикладываемой к боковой поверхности статической нагрузки или нагрузки типа ударной волны. Пластинки изготавливали как из пластичных сплавов типа АМГ-6, так и хрупких материалов типа полиметилметакрилата, целлюлоида и бериллия. На основании анализа результатов испытаний получены эмпирические зависимости, упрощающие расчет величины разрушающей статической нагрузки, а также позволяющие оценить динамическую реакцию перфорированных пластинок при действии ударных волн. Обсуждаются особенности поведения хрупких и пластичных пластинок при соударении с твердыми частицами, движущимися со скоростями 100–2500 м/с, а также особенности поведения поврежденных частицами пластинок при последующем статическом и динамическом нагружении. Эксперименты производились при помощи испытательного комплекса², включающего нагружающие устройства, измерительную систему и систему управления опытом. При испытаниях использовались методы теории планирования эксперимента и анализ размерностей, позволившие значительно сократить объем работ, необходимых для получения критерияльных соотношений между безразмерными комплексами, связывающими параметры системы «нагрузка — пластинка». Представляется важным, что критерияльные соотношения можно получить, не имея дифференциальных уравнений задачи, а зная только все существенные для изучаемого явления параметры и их размерности.

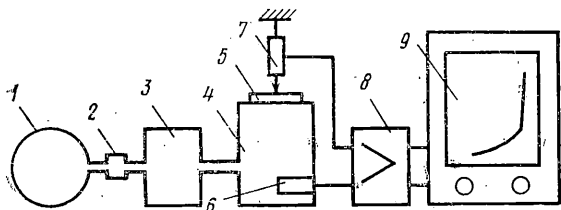
Было проведено несколько серий опытов с круглыми пластинками, изготовленными из алюминий-магниевого сплава марки АМГ-6, бериллия марки ГПД-56, полиметилметакрилата и целлюлоида. Пластинки вытачивали на токарном станке задело с массивным опорным кольцом, обеспечивающим на кромке пластинки условия, близкие к жесткому заземлению. Для осреднения масштабного эффекта радиус пластинок R изменяли от 3 до 9 см. На поверхности пластинок, имеющих толщину h , круговые отверстия диаметром d располагали с шагом b в вершинах квадратной решетки. Количество отверстий варьировали от 60 до 350, параметр d/b , характеризующий степень перфорации, изменяли от 0 до 0,9, параметр геометрического подобия R/h — в диапазоне от 15 до 60.

Рассмотрим некоторые результаты статических испытаний пластинок. Устройство для испытания пластинок на действие равномерного монотонно возрастающего давления (фиг. 1) состоит из последовательно соединенных плунжерного насоса 1, обратного клапана 2, демпфирующей полости 3 и цилиндрической емкости 4, к дну которой крепится при помощи болтов опорное кольцо пластинки 5, снабженное уплотнительной прокладкой из маслястойкой резины. В опытах действующее на пластинку 5 давление измерялось при помощи индукционного датчика 6, перемещение поверхности пластинки регистрировалось контактным датчиком 7, входящим в комплект усилителя 8 типа ВИ-6.

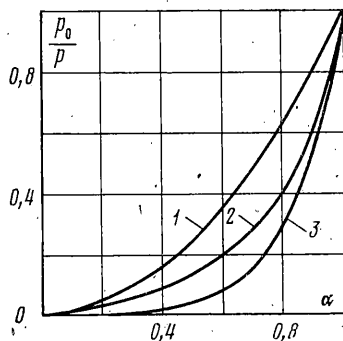
Для повышения точности регистрации значения разрушающего давления сигналы с датчика перемещений и с датчика давлений одновременно подавали на входы X и Y двухкоординатного самописца 9 типа Endim 2200/1. При нагрузке, соответствующей началу разрушения, кривая «давление — прогиб стенки», вычерчиваемая пером самописца на координатной бумаге, имеет характерный и легко различимый излом.

¹ См.: Скурлатов Э. Д., Старцев В. Г. Экспериментальное исследование поведения пластин при динамическом нагружении: Тез. докл. XI Всес. конф. по теории оболочек и пластин. М.: Ин-т проблем механики АН СССР, 1977, с. 36.

² См.: Кармишин А. В., Старцев В. Г., Скурлатов Э. Д., Фельдштейн В. А. Экспериментальные и численные методы в динамике неоднородных тонкостенных конструкций: Тез. докл. VII Всес. конф. по прочности и пластичности. Горьковский ун-т, 1978, с. 65.



Фиг. 1



Фиг. 2

На фиг. 2 приведены результаты испытаний густо перфорированных круглых пластинок, изготовленных из сплава АМг-6 (кривая 1), полиметилметакрилата (кривая 2) и бериллия марки ГПД-56 (кривая 3). По оси ординат отложен параметр, характеризующий отношение разрушающего давления p_0 для перфорированных пластинок к разрушающему давлению p для пластинок без отверстий, по оси абсцисс — параметр $\alpha = (1 - d/b)$, характеризующий степень перфорации.

Все пластинки были изготовлены по одинаковой технологии (технологически подобные модели). Из анализа графиков следует, что пластинки из материалов, имеющих высокую чувствительность к концентраторам напряжений в виде круговых отверстий, обладают значительно пониженной несущей способностью. Наименьшее разрушающее давление имеют пластинки из бериллия (кривая 3), наибольшее — из пластинок сплава АМг-6 (кривая 1). Значения приведенных разрушающих давлений для пластинок из полиметилметакрилата и из целлюлоида практически совпадают. Соответствующая этому случаю кривая 2 занимает промежуточное положение между кривой 1 и кривой 3.

Эмпирические формулы, связывающие между собой величины приведенных давлений и значения безразмерных параметров степени перфорации, имеют для пластинок из алюминия, полиметилметакрилата и бериллия следующий вид:

$$p_0/p = \alpha^2 \text{ при } 0 \leq d/b \leq 1 \quad (1)$$

$$p_0/p = \alpha^4 \text{ при } 0 \leq d/b \leq 0,2; \quad (2)$$

$$p_0/p = 0,625 \alpha^2 \text{ при } 0,2 \leq d/b \leq 1$$

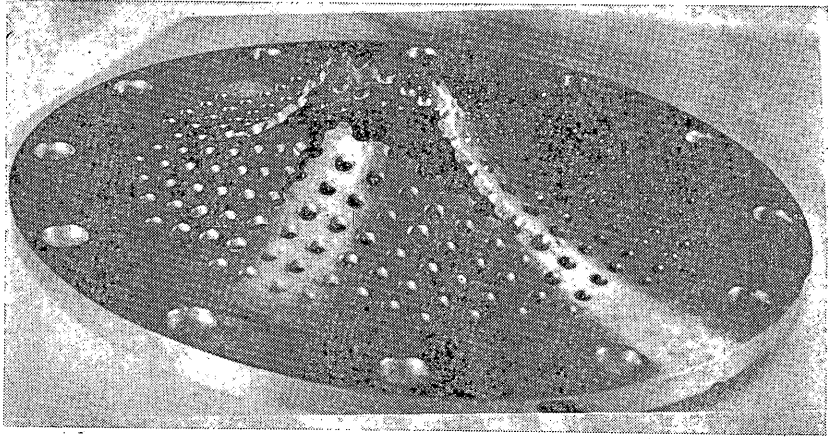
$$p_0/p = \alpha^3 \text{ при } 0 \leq d/b \leq 1 \quad (3)$$

Из аппроксимирующих экспериментальные данные зависимостей (1) — (3) следует, что снижение несущей способности алюминиевых пластин при всех значениях параметра перфорации происходит по квадратичному закону (1). В диапазоне изменения параметра перфорации от 0 до 0,2 у пластинок из полиметилметакрилата происходит более резкое уменьшение величины разрушающего давления (2), что свидетельствует о повышенной чувствительности этого материала к концентраторам в виде небольших отверстий. Еще более интенсивное уменьшение несущей способности наблюдается для бериллиевых пластинок во всем исследованном диапазоне изменения параметра перфорации (уравнение (3)).

Полученные на основании обработки результатов большого числа опытов зависимости (1) — (3) могут быть использованы при практических расчетах; для этого достаточно знать величину разрушающей нагрузки для сплошной пластинки. Наибольшее совпадение расчетных данных с опытом достигается в тех случаях, когда в расчетах по формулам (1) — (3) используется экспериментально определенная величина разрушающего давления для идентичных по конструкции пластинок без отверстий.

Описанные выше результаты были получены в опытах с пластинками, отверстия в стенке которых были выполнены сверлением. Отверстия у второй серии пластинок были получены при помощи твердых высокоскоростных частиц шаровой формы (использовали силикатные частицы), которые металлы специальным устройством в направлении, перпендикулярном стенке пластинок. По мере увеличения скорости частиц от 100 до 2500 м/с на поверхности алюминиевых пластинок возникали вначале локальные вмятины, при более высоких скоростях образовывались кратеры и, наконец, наблюдалось появление сквозных пробоев. У пластинок из хрупких материалов наряду со сквозными отверстиями возникали трещины, соединявшие между собой несколько близких пробоев. При увеличении скорости твердых частиц происходило полное разрушение значительной части стенки пластинок.

Результаты статических испытаний поврежденных частицами алюминиевых пластинок свидетельствует о том, что полученные отверстия в ряде случаев не



Фиг. 3

только не ослабляют пластинку, но и могут способствовать повышению ее несущей способности по отношению к действию последующей нагрузки. Этот эффект объясняется тем, что полученные в результате взаимодействия частиц и пластинки кратеры и пробоины окружены выступающим над поверхностью стенки валом, образованным из расплавленного и выброшенного из лунки металла. Вал подкрепляет отверстия и стесняет деформирование участков пластинки, расположенных между отверстиями.

Цель еще одной серии экспериментов заключалась в исследовании поведения круглых перфорированных пластинок, подвергавшихся воздействию экспоненциальных воздушных ударных волн, имеющих различную интенсивность. Пьезоэлектрическим датчиком регистрировалось давление на жесткой пластинке и время действия нагрузки. При помощи бесконтактного вихретокового датчика измеряли динамической прогиб W_1 в центре пластинки. Эмпирическая зависимость, связывающая величины максимальных динамических прогибов W_1 с параметрами пластинки и импульсной нагрузки, была получена в результате обработки опытных данных по методу наименьших квадратов. В случае открытых отверстий эта зависимость имеет вид

$$\frac{W_1}{h} = \frac{1}{h\rho\sqrt{c}v^{0,15}} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{d}{b}\right)^{0,75} \quad \text{при } 0,75 \leq \frac{d}{b} \leq 1$$

$$\frac{W_1}{h} = \frac{I}{h\rho\sqrt{c}v^{0,15}} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{d}{b}\right)^{0,25} \quad \text{при } 0 \leq \frac{d}{b} \leq 0,75$$
(4)

Для пластинок, отверстия в стенке которых были заглушены прорезиненной тканью, была получена формула в виде

$$\frac{W_1}{h} = \frac{I}{h\rho\sqrt{c}v^{0,15}} \left(\frac{R}{h}\right)^2 \left(1 - \frac{d}{b}\right)^{-0,35}$$
(5)

где c , E , ρ , v — скорость звука, модуль упругости, плотность и коэффициент Пуассона материала пластинки, R , h , d , b — радиус пластинки, толщина стенки, диаметр отверстий и расстояние между отверстиями, I — удельный импульс нагрузки.

Аналогичные результаты были получены для оценки динамических и остаточных прогибов двухслойных и многослойных перфорированных пластинок, слои которых были склеены, либо имели частичное или полное расслоение. В частности, оказалось, что динамический прогиб значительно возрастает при увеличении степени расклея слоев. В то же время колебания пластинок с частичными или полными расслоениями характеризуются быстрым (в течение 3–4 циклов) затуханием возбуждаемых импульсом амплитуд, что объясняется периодическими соударениями слоев, имеющих разные собственные частоты.

Аналогичные зависимости установлены для круглых, прямоугольных, треугольных и шестиугольных пластинок, у которых возникали большие остаточные прогибы, обусловленные действием сильных воздушных и подводных ударных волн. В результате действия сильных воздушных ударных волн круглые пластинки приобретают форму, близкую к пологой сферической панели. На фиг. 3 показаны остаточные прогибы и форма разрушения погруженной в воду перфорированной пластинки. Видно, что форма распределения остаточных прогибов в этом случае отличается от сферической, что объясняется своеобразием взаимодействия подводной ударной волны с погруженной со всех сторон жидкостью перфорированной преградой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скурлатов Э. Д. Поведение цилиндрических оболочек в сверхзвуковом потоке газа.— Расчеты на прочность: Сб. статей. М.: Машиностроение, 1974, вып. 15, с. 356—365.
2. Воробкова Н. Л., Преображенский И. Н. Обзор исследований по устойчивости пластин и оболочек, ослабленных отверстиями.— Расчет пространственных конструкций: Сб. статей. М.: Стройиздат, 1973, вып. 15, с. 89—112.
3. Немировский Б. Я., Преображенский И. Н., Федоров В. А. Линейные и нелинейные задачи устойчивости конструкций типа круглых и кольцевых пластин.— В кн.: Конструкции зданий и сооружений научных комплексов. М.: Наука, 1977, с. 44—49.
4. Григолюк Э. И., Фильштинский Л. А. Перфорированные пластины и оболочки. М.: Наука, 1970. 556 с.

Москва

Поступила в редакцию
12.III.1980

УДК 539.3

ПЛОТНОСТЬ ЧАСТОТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ТОНКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ОБОЛОЧКИ,
СОСТАВЛЕННОЙ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ СЛОЕВ

ГУЛГАЗАРЯН Г. Р., ЛИДСКИЙ В. В.

Найдена плотность частот свободных колебаний тонкой оболочки произвольного очертания, составленной из анизотропных слоев.

1. Свободные колебания слоистой оболочки, собранной из $m+n$ анизотропных слоев, описываются в классической теории [1] системой дифференциальных уравнений:

$$\sum_{j=1}^3 (h^2 n_{ij} + h k_{ij} + l_{ij}) \ddot{u}_j = \lambda \sum_{j=1}^3 (\delta_{ij} + h q_{ij} + h^2 p_{ij}) u_j \quad (i=1,2,3) \quad (1.1)$$

при граничных условиях, зависящих от характера закрепления на краях.

Здесь λ — спектральный параметр, который на постоянный множитель отличается от квадрата частоты ω свободных колебаний, h — относительная толщина оболочки (малый параметр), $u_j(\alpha, \beta)$ — компоненты вектора перемещения, δ_{ij} — символ Кронекера, $n_{ij}, k_{ij}, l_{ij}, q_{ij}, p_{ij}$ — дифференциальные операторы, явный вид которых не приводится. Их можно получить выразив усилия и моменты через перемещения [1, с. 344]. Инерционные члены при этом берутся как и в [1].

Система (1.1) является системой Лагранжа — Эйлера для функционала $V - \omega^2 T$, где

$$V = \frac{1}{2} \iint_G (h C_{ij}^\circ \varepsilon_i \varepsilon_j + 2h^2 K_{ij}^\circ \varepsilon_i \kappa_j + h^3 D_{ij}^\circ \kappa_i \kappa_j) dS \quad (1.2)$$

— потенциальная энергия деформации [1, с. 166], $\omega^2 T$ — кинетическая энергия

$$T = \frac{1}{2} \iint_G (h C_\rho^\circ \delta_{ij} u_i u_j - 2h^2 A^{-1} K_\rho^\circ u_{3,\alpha} u_{1-} - 2h^2 K_\rho^\circ B^{-1} u_{3,\beta} u_2 + h^3 D_\rho^\circ (A^{-2} u_{3,\alpha}^2 + B^{-2} u_{3,\beta}^2)) dS \quad (1.3)$$

В (1.2) и (1.3) $dS = AB d\alpha d\beta$ и по сравнению с [1] введены обозначения $C_{ij}^\circ = h^{-1} C_{ij}, K_{ij}^\circ = h^{-2} K_{ij}, D_{ij}^\circ = h^{-3} D_{ij}, C_\rho^\circ = h^{-1} C_\rho, K_\rho^\circ = h^{-2} K_\rho, D_\rho^\circ = h^{-3} D_\rho$. При этом предполагается, что все отношения $\delta_s / h, s=1, 2, \dots, m+n$ [1, с. 164, 345], характеризующие положение слоев, при $h \rightarrow 0$ сохраняются. Матрица

$$A_0 = \begin{vmatrix} C_0 & K_0 \\ K_0 & D_0 \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

размеров 6×6 , в которой $C_0 = \|C_{ij}^\circ\|, K_0 = \|K_{ij}^\circ\|, D_0 = \|D_{ij}^\circ\|$ матрицы размеров 3×3 , предполагается положительно-определенной. Это эквивалентно положительно определенной квадратичной формы, стоящей под знаком интеграла в (1.2).