

*М.В. Чернобрылко, к.т.н., доцент, ХНУ им. В.Н. Каразина,
С.Д. Светличная, к.т.н., доцент, НУГЗУ*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТА ЗДАНИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКЕ

(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

Рассматривается оребренная плита с проемом под действием ударно-волновой нагрузки; проводится анализ ее степени повреждения. Определяется интенсивность напряжений как функция деформации, скорости деформаций, температуры и времени. Учитываются динамические свойства материалов. Исследования проводятся численно-аналитическим методом, точность численного моделирования проверяется на каждом временном этапе расчета.

Ключевые слова: ударно-волновая нагрузка, динамическая прочность, критерий разрушения, оребренная плита.

Постановка проблемы. Целый ряд промышленных строительных объектов и жилых зданий в результате детонационного воздействия сохраняет свою целостность. Однако деформации отдельных несущих элементов с течением времени приводят к разрушению. Избежать такого разрушения можно путем укрепления деформированных элементов конструкций. Для выявления этих элементов необходимо создание современных инженерных методик оценки прочности для зданий, находящихся в экстремальных условиях эксплуатации. Моделирование их поведения во время нагрузки требует уточненных, в сравнении с традиционными, математических моделей.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ нестационарного поведения элементов строительных конструкций объектов при ударно-волновых воздействиях является актуальной, но достаточно сложной задачей. В монографии [1] обобщены многолетние экспериментальные исследования и приведены упрощенные инженерные методики оценки последствий детонационных воздействий на типовые элементы строительных сооружений. Однако исследования деформирования материалов и элементов конструкций при высоких скоростях деформаций показали, что необходимо использовать нелинейные модели [2, 3], а также динамические характеристики материала [4]. Такой подход позволяет получить интенсивность напряжений как функцию деформации, ее скорости, температуры и времени и прогнозировать степень разрушения конструкции.

Постановка задачи и ее решение. Рассмотрим один из наиболее общих элементов строительных сооружений – панель с ребрами и про-

емами. В качестве исходной модели рассматривается динамическая деформация пластины переменной толщины $h(x,y)$ с ребрами и вырезами. При наличии системы односторонних ребер нейтральная поверхность смещается на величину $z_p(x,y)$, которая предполагается изменяющейся плавно, так что может быть использована общая теория пластин [2].

Исследования проводятся численно-аналитическим методом. Для этого записывается вариационное уравнение задачи для пластины с N ребрами, которое имеет вид

$$\int_{t_1}^{t_2} \left\{ \delta \left[\left(\Pi + \sum_{i=1}^N \Pi_i \right) - \left(T + \sum_{i=1}^N T_i \right) \right] - \iint_{(F)} q(x,y,t) \delta W \right\} dt = 0,$$

где Π – потенциальная энергия пластины без ребер, Π_i – потенциальная энергия i -го ребра, T – кинетическая энергия пластины без ребер, T_i – кинетическая энергия i -го ребра, $q(x,y,t)$ – ударно-волновая нагрузка, W – перемещение пластины в нормальном направлении.

Потенциальную и кинетическую энергии пластины с учетом смещения нейтральной оси можно выразить следующим образом

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} \iint_{(F)} D \left\{ (\Delta W)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial W}{\partial x^2} \frac{\partial W}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy + \\ &+ \frac{1}{2} \iint_{(F)} D_0 \left\{ z_p^2 \left[\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + (1-\nu) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy, \\ T &= \frac{1}{2} \iint_{(F)} \rho \left\{ h \left(\frac{\partial W}{\partial t} \right)^2 + (J + z_p^2 h) \left[\left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y \partial t} \right)^2 \right] \right\} dx dy, \end{aligned}$$

где J – ее момент инерции, Δ – символ Лапласа, ρ – плотность материала, ν – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости, t – время,

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad D_0 = \frac{Eh}{1-\nu^2}.$$

А потенциальная и кинетическая энергии ребер в продольном и поперечном направлении, выраженные через перемещения пластины в местах их крепления, записываются в форме

$$\begin{aligned} \Pi_{xi} &= \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} \left\{ E(I_{yi} + z_x^2 F_{xi}) \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right)^2 + GI_{di} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)_i \right]^2 \right\} dx, \\ \Pi_{yj} &= \frac{1}{2} \int_{y_1}^{y_2} \left\{ E(I_{xj} + z_y^2 F_{yj}) \left(\frac{\partial^2 W_j}{\partial x^2} \right)^2 + GI_{dj} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_j \right]^2 \right\} dy, \\ T_{xi} &= \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} \rho \left\{ W_i^2 F_{xi} + J_{pi} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)_i + (J_{yi} + z_x^2 F_{xi}) \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_i \right\} dx, \\ T_{yj} &= \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} \rho \left\{ W_j^2 F_{yj} + J_{pj} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_j + (J_{xj} + z_y^2 F_{yj}) \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)_j \right\} dy, \end{aligned}$$

где i – номер ребра в продольном направлении, j – в поперечном, W_i, W_j – перемещения ребер, J_{yi}, J_{xj} – осевые моменты инерции ребер, I_{pi}, I_{pj} – поперечные, GI_{di}, GI_{dj} – жесткости ребер на кручение, F_{xi}, F_{yj} – площади их поперечных сечений.

Перемещения и нагрузка раскладываются по базисным функциям. В результате задача сводится к системе дифференциальных уравнений, решение которой зависит от способа заделки краев плиты и количества ребер и проемов. Интегрирование полученных уравнений проводится численными методами, в результате которого определяются перемещения конструкции.

После определения перемещений находятся интенсивности напряжений. Если они превышают динамический предел упругости [2], то в данной области напряженно-деформированное состояние определяется с учетом динамических характеристик материала [4]. При анализе развития деформационного процесса в пластической стадии необходима проверка возможности появления трещин и разрушений. Для этого могут применяться различные критерии прочности. Здесь использовался критерий Писаренко-Лебедева [3], поскольку этот критерий предполагает, что предельное состояние материала определяется и касательными, и нормальными напряжениями.

Рассмотрено динамическое напряженно-деформированное состояние шарнирно опертой по краям плиты $10 \text{ м} \times 4 \text{ м} \times 0,12 \text{ м}$ с продольными и поперечными ребрами $0,06 \text{ м} \times 0,06 \text{ м}$, расположенными через каждые $0,5 \text{ м}$, из материала, свойства которого характеризуются следующими параметрами: $\sigma_s = 2,45 \cdot 10^8 \text{ Па}$ – статический предел упругости, $\sigma_s^{\text{din}} = 2,85 \cdot 10^8 \text{ Па}$ – динамический предел упругости, $\sigma_{\text{п}} = 3,87 \cdot 10^8 \text{ Па}$ – предел прочности. Максимальное значение избыточного давления при ударно-волновой нагрузке 40,53 кПа. Расчеты проводи-

лись с момента времени, когда нагрузка достигла максимального значения. Результаты исследований, представлены на рис. 1.

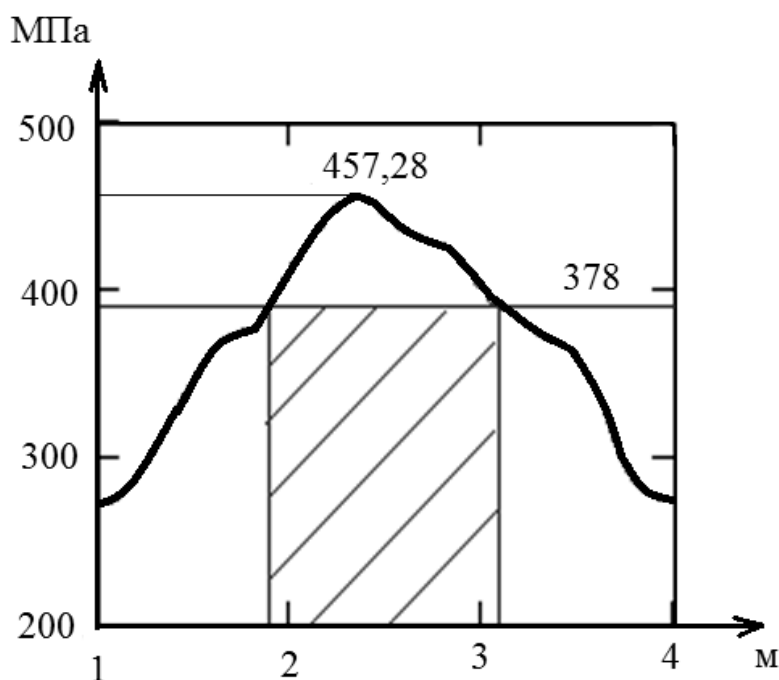


Рис. 1. Интенсивность напряжений вдоль фиксированной линии $y = 5$ м в момент времени 1 мс с момента максимального нагружения

На рис. 1 показаны значения интенсивности напряжений в поперечном сечении в центре плиты в момент времени 1 мс с момента максимального нагружения. Эти напряжения превосходят предел прочности, поэтому можно прогнозировать разрушение плиты в ее центральной части на участке более одного метра по ширине.

Выводы. Предложенный метод позволяет оценить значения интенсивности напряжений, определенных в каждой заданной точке плиты, и далее, на основании этих данных, сделать вывод о целостности и прогнозировать зоны разрушений. Эти зоны устанавливаются согласно базы данных о механических характеристиках бетона, железобетона или любого другого материала конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейкер У. Взрывные явления. Оценка и их последствия / У. Бейкер, П. Кокс. – М.: Мир, 1986 – Кн. 1 – 319 с., Кн. 2 – 384 с.
2. Воробьев Ю.С. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К.: Наук, думка, 1989. – 192 с.
3. Писаренко Г.С. Деформации и напряжения в материалах при скоростном деформировании / Г.С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К.: Наук, думка, 1976. – 187 с.

4. Чернобрывко М.В. Моделирование динамических деформационных процессов в защитных контейнерах при детонационном воздействии / М.В. Чернобрывко, С.Д. Светличная, В.М. Комяк // Проблемы надзвичайних ситуацій. – 2014. – Вип. 17. – С. 162-169.

М.В. Чернобрывко, С.Д. Світлична

Моделювання деформації та руйнування елементу будівлі при ударно-хвильовому навантаженні

Розглядається обрєблена плита з прорізом під дією ударно-хвильового навантаження, проводиться аналіз її ступеня пошкодження. Визначається інтенсивність напружень як функція деформації, її швидкості, температури та часу. Враховуються динамічні властивості матеріалів. Дослідження проводяться чисельно-аналітичним методом, точність чисельного моделювання перевіряється на кожному часовому етапі розрахунків.

Ключові слова: ударно-хвильові навантаження, динамічна міцність, критерій руйнування, плита з ребрами.

M.V. Chernobryvko, S.D. Svetlichna

Modelling deformation and destruction of building element under shock-wave loading

Finned plates with aperture under the action of detonation load are considered. Deformations are described by nonlinear model. The strain rate deformation of structural elements takes place both in the elastic and in plastic stage. Both finite deformations and dynamic properties of materials are taken into account. The modified method of numerical analysis is suggested. The accuracy of the numerical simulation is verified on each temporal step of calculation and in the case of large deformation gradients.

Key words: shock-wave loading, dynamic strength, failure criterion, finned plate.