

РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОВТ

УДК 623.438 (001.57)

С.П. Бісик¹, В.Г. Корбач², В.А. Голуб¹

¹Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України

²ДП «Державне Київське конструкторське бюро «Луч»

ЧИСЛОВЕ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ УДАРНО-ХВИЛЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПЛАСТИНИ

У статті наведена розрахункова модель для числового моделювання ударно-хвильового навантаження закріпленої по контуру металевої пластини та результати моделювання з використанням програмного комплексу скінченно-елементного аналізу. Запропоновано використання даної розрахункової моделі для дослідження та покращення протимінної стійкості зразків озброєння та військової техніки.

Ключові слова: числове моделювання, метод скінченних елементів, вибух.

Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень та публікацій

Результати аналізу збройних конфліктів останніх трьох десятиріч показують, що значна частина бойових пошкоджень озброєння та військової техніки (ОВТ) і загибелі їх екіпажів спричинена внаслідок ураження мінами та саморобними вибуховими пристроями [1]. Тому є актуальним рішення задачі визначення динамічної міцності конструкційних матеріалів при інтенсивному ударно-хвильовому навантаженні (УХН) для покращення протимінної стійкості зразків ОВТ. Методи її рішення базуються, як правило, на двох підходах: 1) числовому – з використанням розрахункових моделей; 2) аналітичному – з використанням спрощених моделей. Використання другого підходу прийнятне в окремих випадках, коли допускається спрощений розрахунок. Числові методи в задачах фізики швидкоплинних процесів на сьогоднішній день є важливим і досить ефективним інструментом моделювання процесів, що протікають в екстремальних умовах навантаження конструкції зразка ОВТ. Використання числових методів в поєднанні з методами програмування і можливостями електронно-обчислювальної техніки дозволяє створювати розрахункові методики, які є потужним інструментом інженера-дослідника, та дозволяє отримувати апріорну експертну оцінку конструкції, досліджувати вплив параметрів конструкції і фізико-механічних характеристик матеріалу її елементів на параметри функціонування конструкції в цілому, визначати закономірності того чи іншого процесу, що лежить в основі роботи конкретної конструкції

зразка ОВТ. Числове моделювання, зрозуміло, не може замінити традиційних експериментальних методів дослідження, але може суттєво мінімізувати їх кількість та доповнити, що зробить більш ефективним весь процес вивчення, створення і покращення протимінної стійкості зразків ОВТ.

У роботах [2–4] наведені результати досліджень УХН конструкційних матеріалів, описані особливості їх поведінки та методики випробовувань. Однак у даних роботах об'єктами досліджень є фігури правильної геометричної форми з віссесиметричним УХН, що на практиці зустрічається вкрай рідко.

Метою статті є розробка розрахункової моделі дослідження параметрів ударно-хвильового навантаження конструкційних матеріалів для оцінки та вдосконалення протимінної стійкості зразків ОВТ.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що одним з критеріїв, який визначає достовірність результатів, отриманих розрахунковим шляхом, та адекватність сформульованої моделі реальному процесу є відповідність розрахункових і експериментальних даних [5]. В якості останніх використовувались експериментальні дані вибухового навантаження представлени в роботі [6].

Експериментальна установка для ударно-хвильового навантаження пластини та схема реєстрації ударно-хвильового навантаження (УХН) пластини наведена на рис.1.

Металева пластина, з розмірами 1200x1200x5мм, встановлена на залізобетонних блоках та закріплена 24 болтами по периметру. Характеристики матеріалу пластини наведені в таблиці. Пластина перекриває блоки на 100 мм з кожної сторони. Вибухова

речовина (ВР) – пентоліт, масою 250 г (теплота вибуху $Q=4,75$ МДж/кг), ініціюється на відстані 250 мм, 400 мм, 500 мм до пластини.

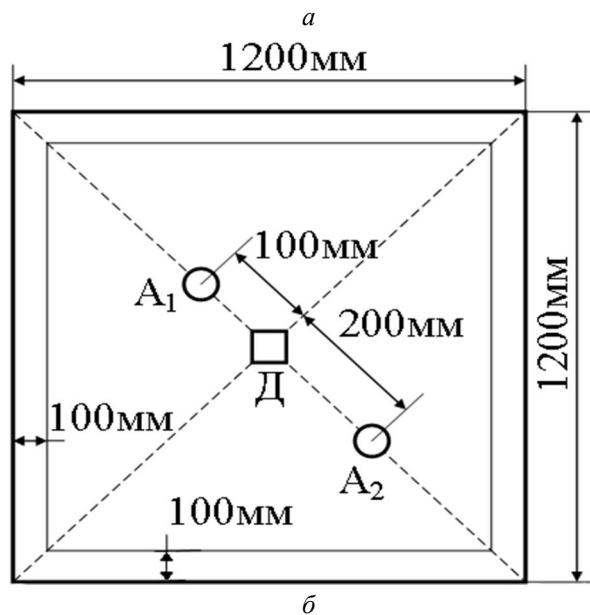
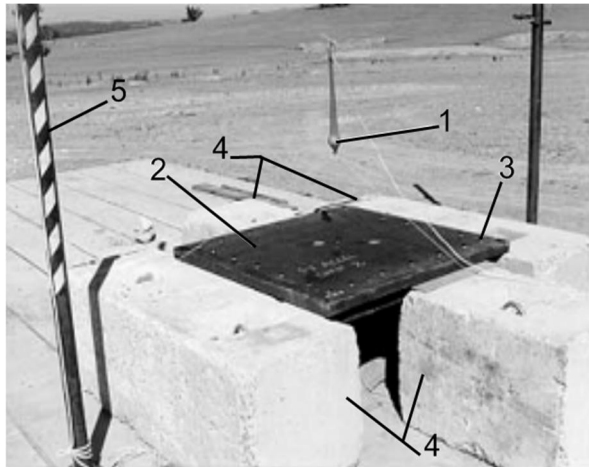


Рис. 1. Експериментальна установка (а) та схема розташування точок реєстрації (б) ударно-хвильового навантаження пластини:

- 1 – вибухова речовина, 2 – пластина,
3 – елементи кріплення пластини, 4 – бетонні блоки,
5 – кронштейн для кріплення вибухової речовини,
Д – точка реєстрації динамічного переміщення,
А₁, А₂ – точки реєстрації прискорення

Детальний опис експерименту та характеристик вимірювальної апаратури для реєстрації УХН наведений в [6].

Таблиця

Характеристики матеріалу пластини

Характеристика	Сталь	Алюміній
Модуль пружності, ГПа	203	70
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,33
Межа плинності, МПа	270	230
Модуль зміцнення, МПа	470	340
Густина, кг/м ³	7850	2630

Для вирішення поставленої задачі використовувався математичний лагранжів підхід скінченно-елементного моделювання процесу УХН вказаної пластини з використанням багатоцільової програмної системи скінченно-елементного аналізу. Для врахування залежності міцнісних характеристик (межі плинності і модуля зсуву) від параметрів УХН (швидкості пластичних деформацій, досягнутого рівня пластичних деформацій і температури) використовувалась модель Джонсона-Кука [7]. При цьому, відповідно до даної моделі, динамічна межа плинності визначена співвідношенням (1)

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p^n}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (1)$$

- де ε_p – ефективна пластична деформація;
 T_m – температура плавлення;
 T_r – температура навколишнього середовища;
 $A, B, c, n, m, \varepsilon_0$ – параметри моделі.

Функція тиску УХ задана у вигляді експоненціальної залежності (2). Застосування даного підходу дозволяє моделювати УХН з достатньою точністю без проведення трудомістких розрахунків детонації вибухової речовини. Необхідно звернути увагу на те, що у даній функції ігнорується від'ємна стадія УХ, так як її вплив на параметри УХН є незначним [8].

$$P(t) = P_{SO} \cdot (1 - (t - t_a)/t_d) \cdot \exp(-A \cdot (t - t_a)/t_d), \quad (2)$$

- де $P(t)$ – тиск УХ на момент часу t ;
 P_{SO} – максимальний тиск падаючої УХ;
 t_a – час досягнення УХ об'єкта;
 t_d – час дії позитивної фази УХ;
 A – коефіцієнт затухання.

В якості еталону вибухової речовини використовується тринітротолуол (ТНТ). Тому при використанні ВР іншого типу виконувався перерахунок маси цієї ВР в еквівалентну масу ТНТ, використовуючи вираз (3) [9].

$$m_{екв} = m_{ВР} \cdot \frac{Q_{ВР}}{Q_{ТНТ}}, \quad (3)$$

- де $m_{екв}$ – еквівалентна маса ТНТ;
 $m_{ВР}$ – маса ВР, що використовується;
 $Q_{ВР}$ – теплота вибуху ВР, що використовується;
 $Q_{ТНТ}$ – теплота вибуху ТНТ.

Розмірність скінченно-елементної (СЕ) моделі, що безпосередньо визначає точність моделювання, визначена шляхом порівняння розрахункових значень динамічного переміщення точки Д з експериментальними при відстані між пластиною та центром заряду ВР 400 мм (рис. 2).

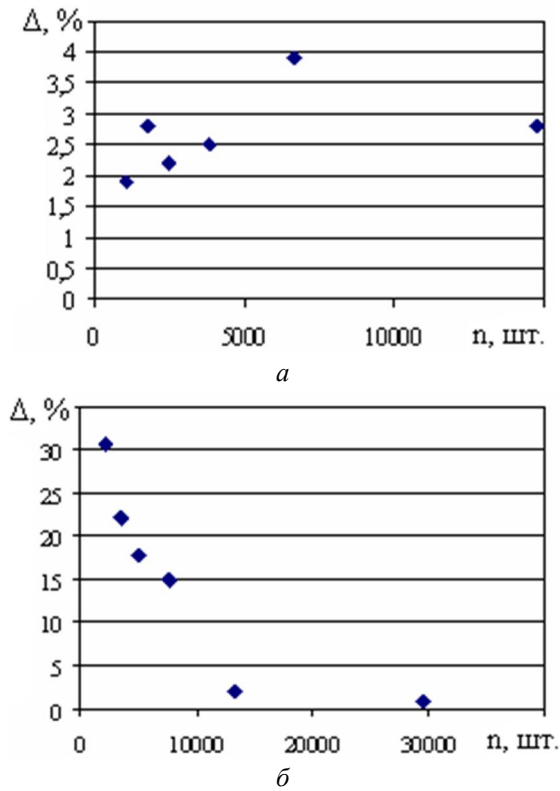


Рис. 2. Залежність відносної похибки обчислення (Δ) від кількості вузлів моделі (n):
а – оболонкові елементи, б – об'ємні елементи

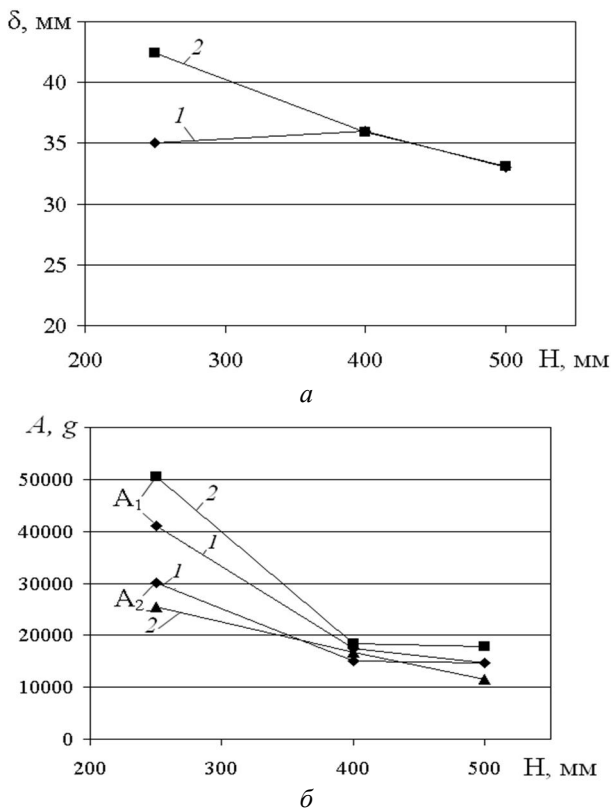


Рис. 3. Порівняння результатів натурального експерименту (1) та числового моделювання (2):
а – максимальні динамічні переміщення (δ) точки Д;
б – максимальні прискорення (A) точок A_1 , A_2 ;
Н – відстань від ВР до пластини

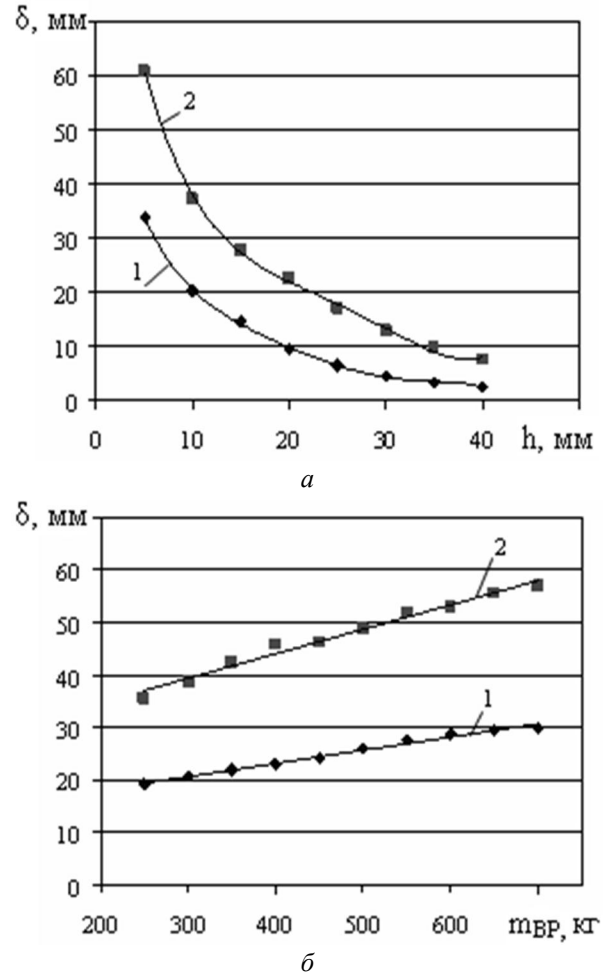


Рис. 4. Залежність максимального динамічного прогину пластини від її товщини (a) при масі пентоліту 250г та від маси вибухової речовини (δ) при товщині пластини 10мм:
1 – стальна пластинка, 2 – алюмінієва пластинка

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що при побудові СЕ-моделі об'ємними елементами відносна похибка (Δ) значно залежить від її розмірності. При аналогічній побудові СЕ-моделі оболонковими елементами варіювання розмірності СЕ-моделі призводить до незначної зміни Δ , що забезпечує більшу імовірність точності розрахунків.

Порівняння результатів експерименту та результатів числового моделювання з вибраною СЕ-моделлю наведено на рис. 3. Аналіз отриманих результатів вказує на високу точність розрахунку динамічного прогину пластини при відстані до ВР більше 400 мм. Зростання відносної похибки розрахунків при відстані 250 мм до ВР пояснюється недосконалістю моделі визначення питомого імпульсу потоку повітря за фронтом ударної хвилі [9].

З використанням розробленої розрахункової моделі проведені дослідження для різних режимів УХП пластини із варіюванням матеріалу пластини, відстані ВР до пластини (H), маси вибухової речовини

(m_{BP}) та товщини пластини (h). Характеристики матеріалів, що використовувались при дослідженнях, наведені в таблиці. Результати числового моделювання наведені на рис. 4.

Аналіз результатів числового моделювання вказує на лінійну залежність між масою ВР та максимальними динамічними прогинами пластини (рис. 4 б), при цьому матеріал, з якого виконана пластина, на характер даної залежності не впливає. Залежність між максимальним динамічним прогином пластини та товщиною пластини (рис. 4 а) за умови збереження однакових параметрів УХН має нелінійний характер.

Висновки

Розроблена розрахункова модель дослідження параметрів ударно-хвильового навантаження конструкційних матеріалів з використанням методу скінченних елементів реалізованого в програмному комплексі дозволяє з високою точністю моделювати даний процес, та може бути використана для оцінки протимінної стійкості зразків ОБТ. Рекомендується: задавати ударно-хвильове навантаження у вигляді функції тиску від часу, що дозволить уникнути рішення складної задачі детонації; використовувати оболонкові елементи для побудови скінченно-елементної моделі конструкції, що значно скорочує час розрахунків та при варіюванні кроку сітки забезпечить більш високу точність розрахунків.

Список літератури

1. Денисенко А.М. Методика оценки защищающей способности системы активной противоминной защиты легких бронированных машин // Артиллерийское и стрелковое

вооружение. Международный научно-технический сборник / А.М. Денисенко. – К.: НТЦ АСВ. – 2007. – Вып. № 2. – С. 3–8.

2. Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении / Г.В. Степанов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.

3. Орленко Л.П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках / Л.П. Орленко. – М.: Машиностроение, 1964. – 168 с.

4. Галиев Ш.У., Бабич Ю.Н., Жураховский С.В. и др. Численное моделирование волновых процессов в ограниченных средах / Ш.У. Галиев, Ю.Н. Бабич, С.В. Жураховский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 200 с.

5. Прикладная механика сплошных сред / Под ред. В.В. Селиванова. – Изд. 2-е, испр. – В 3 т. Т. 3. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2006. – 520 с.

6. Boyd S.D. Acceleration of a plate subjected to explosive blast loading – trial results // Aeronautical and Maritime Research Laboratory – 2000.

7. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.icmm.ru/journal/download/CCMv3n1a4.pdf>

8. External blast load on structures – Empirical approach [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dynalook.com/>

9. Селиванов В.В. Взрывные технологии: Учебник для вузов / В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков / Под общей ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648с.

Рецензент: доктор технічних наук, професор К.Б. Круковський-Сіневич, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ.

Численное решение задачи упруго-волнового нагружения пластины

С.П. Бисык, В.Г. Корбач, В.А. Голуб

В статье приведена расчетная модель для численного моделирования ударно-волнового нагружения закрепленной по контуру металлической пластины и результаты моделирования с использованием программного комплекса конечно-элементного анализа. Предложено использование данной расчетной модели для оценки и совершенствования противоминной стойкости объектов вооружения и военной техники.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, взрыв.

Numerical solution of plate shock loading

S.P. Bisyk, V.H. Korbach, V.A. Holub

This article presents the calculation model of numerical simulation of shock loading of the metal plate fixed on a contour and results of modeling with use of a program complex of the finite element analysis.

Keywords: numerical simulation, finite element method, explosion.