

## **ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОБИТТЯ ГОМОГЕННОЇ ПЕРЕШКОДИ УДАРНИКОМ З РІЗНОЮ ФОРМОЮ ГОЛОВНОЇ ЧАСТИНИ**

*В роботі представлені результати чисельного моделювання пробиття перешкоди товщиною 12мм ударниками з різною формою головної частини.*

*В работе представлены результаты численного моделирования пробития преграды толщиной 12мм ударниками с различной формой головной части.*

**Актуальність.** На сьогодні методи дослідження складних високошвидкісних фізичних процесів(таких як удар, вибух та інші імпульсні навантаження) суттєво розвинулися в порівнянні з минулим століттям. Це пов'язано, на сам перед, з створенням нових елементів випробувальних установок, що дають можливість більш точно отримати експериментальні дані (напр. швидкості польоту ударників в момент зіткнення з перешкодою та після її пробиття, швидкості розльоту утворених внаслідок вибуху осколків , кумулятивних струменів та ін.). Проте такі експерименти вимагають використання складного обладнання та залучення значних коштів. Крім того, сучасний розвиток ЕОМ дає змогу підійти до вирішення даних проблем з іншого боку, тобто створювати, як приклад, чисельні моделі досліджуваних об'єктів та проводити аналіз їх поведінки. У комплексі з проведенням натурних експериментів це дасть змогу більш точно та швидко отримувати інформацію про поведінку об'єктів при складних навантаженнях.

Одним із таких видів експериментів є дослідження пробиття різного типу бронеелементів кулями(ударниками). Їх актуальність не піддається сумніву, так як сучасний темп розвитку нових уражаючих елементів повинен супроводжуватись таким саме темпом розвитку засобів захисту від них.

**Метою даної** роботи є розробка чисельної моделі пробиття ударником гомогенної перешкоди та дослідження, з її використанням, впливу геометричної форми головної частини ударника при різних швидкостях зустрічі з перешкодою на швидкісні параметри (залишкова швидкість у разі пробиття перешкоди, швидкість утвореної під час пробиття пробки, балістичні границі для різних типів ударників) за допомогою чисельного моделювання.

**Основна частина.** Досліджувалися три типи форм головної частини ударника: циліндрична, напівсферична та конічна.

Вибір саме таких форм пояснюється різним типом комбінацій виникаючих під час проникнення в перешкоду напружень, що характеризує механізми пробиття.

Під час проведення натурних експериментів у якості перешкоди використовувалася жорстко закріплена кругла пластина діаметром 500 мм та товщиною 12 мм виготовлену зі сталі WELDOX 460E [1] з характеристиками наведеними в табл.1.

Таблиця 1 - Характеристики сталі WELDOX 460E

E(GPa)	$\nu$	$\frac{kg}{\rho(m^3)}$	A(MPa)	B(MPa)	
200	0.33	7850	490	807	
$C_p (J/kgK)$	$\alpha$	$\bar{\alpha} (1/K)$	$T_m(K)$	$T_0(K)$	
452	0.9	$1.1 \cdot 10^{-5}$	1800	293	
n	$\rho_0 \cdot r_0 (1/s)$	C	$D_c$	$p_d$	
0.73	$5 \cdot 10^{-4}$	0.0144	0.30	0	
m	D1	D2	D3	D4	D5
0.94	0.0705	1.732	-0.54	-0.015	0

В якості ударників використовувалися циліндри діаметром 20 мм та масою 0,197 кг. Інші геометричні розміри ударників підбиралися з умови незмінності маси ударника(рис.1). Ударники виготовлені зі сталі ARNETOOLSTEEL [1] з характеристиками наведеними в табл.2.

Таблиця 2

Константи матеріала для сталі ARNETOOLSTEEL

E(GPa)	$\nu$	$\frac{kg}{\rho(m^3)}$	$\sigma_0$ (MPa)	$E_t$ (GPa)	$\epsilon_f$ (%)
204	0.33	7850	1900	15	2.15

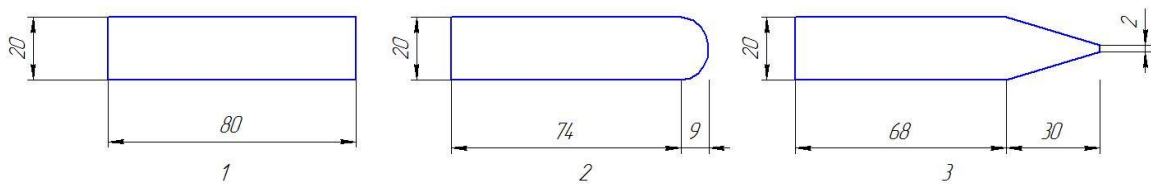


Рис.1. Геометричні розміри ударників з різними типами головної частини: 1 – циліндрична; 2 – напівсферична; 3 – конічна

Скінченно-елементні моделі досліджуваних об'єктів (ударник та перешкода) були створені за допомогою програми «FEMAP with NX NASTRAN»[2]. Для скорочення часу обчислень було використано вісесиметричну постановку задачі. Розрахункові схеми показані на рис.2

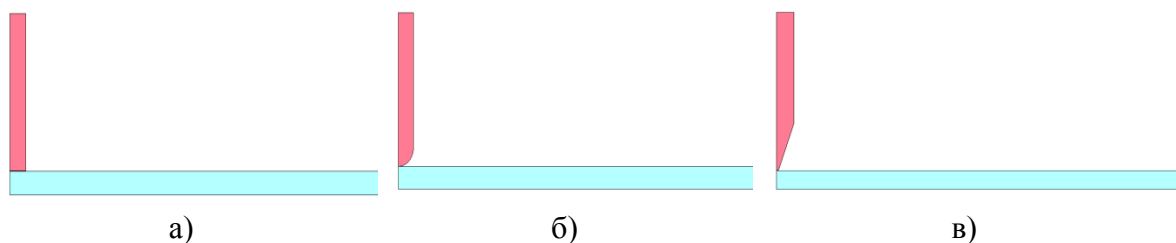


Рис.2 Розрахункові схеми моделювання пробиття ударником перешкоди: а)для варіанту з циліндричною головною частиною;б)для варіанту з напівсферичною головною частиною;в)для варіанту з конічною головною частиною

Для моделювання поведінки перешкоди були використані плоскі трикутні скінченні елементи з розмірами катетів 0,2 мм, тобто 60 елементів по товщині пластини. Для зменшення часу розрахунку розміри елементів були збільшенні ближче

до закріпленої частини пластини. Для моделювання поведінки ударника(усіх 3-х типів) використовувалися плоскі 4-х вузлові елементи з характерним розміром 1 мм (0,5 мм для конічної форми головної частини).

Для дослідження поведінки пластини при пробитті ударником з урахуванням залежності пластичності матеріалу від температурних змін використовувалися модель пластичності матеріалу Джонсона-Кука (JOHNSON-COOK) [3]:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\varepsilon}^n) \cdot (1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}),$$

де  $A, B, C, n$  і  $m$  - константи матеріалу;  $\bar{\varepsilon}^p$  - ефективна пластична деформація;  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\bar{\varepsilon}}^p / \dot{\varepsilon}_0$  швидкість ефективної пластичної деформації для  $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$ ;  $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$  - гомологічна температура.

Деформація при руйнуванні задавалась залежністю:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] \cdot [1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot [1 - T^*],$$

де  $\sigma^* = p / \sigma_{eff}$  - співвідношення тиску до ефективних напружень.

Руйнування відбувається за умови, якщо параметр руйнування  $D = \sum \bar{\varepsilon}^p / \varepsilon^f$  досягає значення 1.

Залежність тиску та об'єму пластини описувалась з використанням рівняння стану Мі-Грюнайзена (MI-GRUNEISEN)[4]:

$$p = \left[ \frac{\rho_0 \cdot C^2 \cdot \mu [1 + (1 - \gamma_0 / 2)\mu - a / 2\mu^2]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} \right] + (\gamma_0 + a\mu)E,$$

де  $C$  – кутовий коефіцієнт кривої  $v_s - v_p$ ;  $S_1, S_2, S_3$  - коефіцієнти нахилу кривої  $v_s - v_p$ ;

$\gamma_0$  - постійна Грюнайзена;  $a$  - корекція об'єму першого порядку  $\gamma_0$ ;  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ .

Оскільки основним об'єктом досліджень була саме пластини, то для скорочення часу обчислень поведінку матеріалу ударника було описано використовуючи моделі Купера-Саймондса (Copper-Symonds)[4]:

$$\sigma_T = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p); \quad E_p = E_{tg} E / (E - E_{tg}); \quad \varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left( \frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt,$$

де  $p$  і  $C$  – параметри швидкості деформацій;  $\dot{\varepsilon}$  – швидкість деформацій;  $\sigma_0$  і  $\sigma_T$  – статична та динамічна границі текучості;  $E$  – модуль пружності;  $E_{tg}$  – модуль зміцнення.

Швидкість пластичних деформацій визначається як різниця між швидкостями повних і пружних деформацій  $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^e$ .

За допомогою чисельного моделювання були отримані значення швидкостей ударника за перешкодою після пробиття (рис.3-5), значення швидкості пробки для циліндричної та напівсферичної головної частин ударника (рис.6-7).

За результатами проведених досліджень можна зробити такі **висновки**:

порівняння отриманих числових значень з даними експериментальних досліджень показують, що відносна похибка вирішення задачі пробиття ударником з різними геометричними формами головної частини гомогенної броні знаходиться в діапазоні 2-8 %;

за результатами оцінки сходимості чисельного рішення отримані значення розмірів скінченних елементів, що дозволяють отримувати адекватне рішення в діапазоні швидкості удару 180-800 м/с;

розроблена числова модель може бути використана для оцінки захисних елементів в конструкції бойових броньованих машин та проведення їх параметричного синтезу за обраним критерієм ефективності.

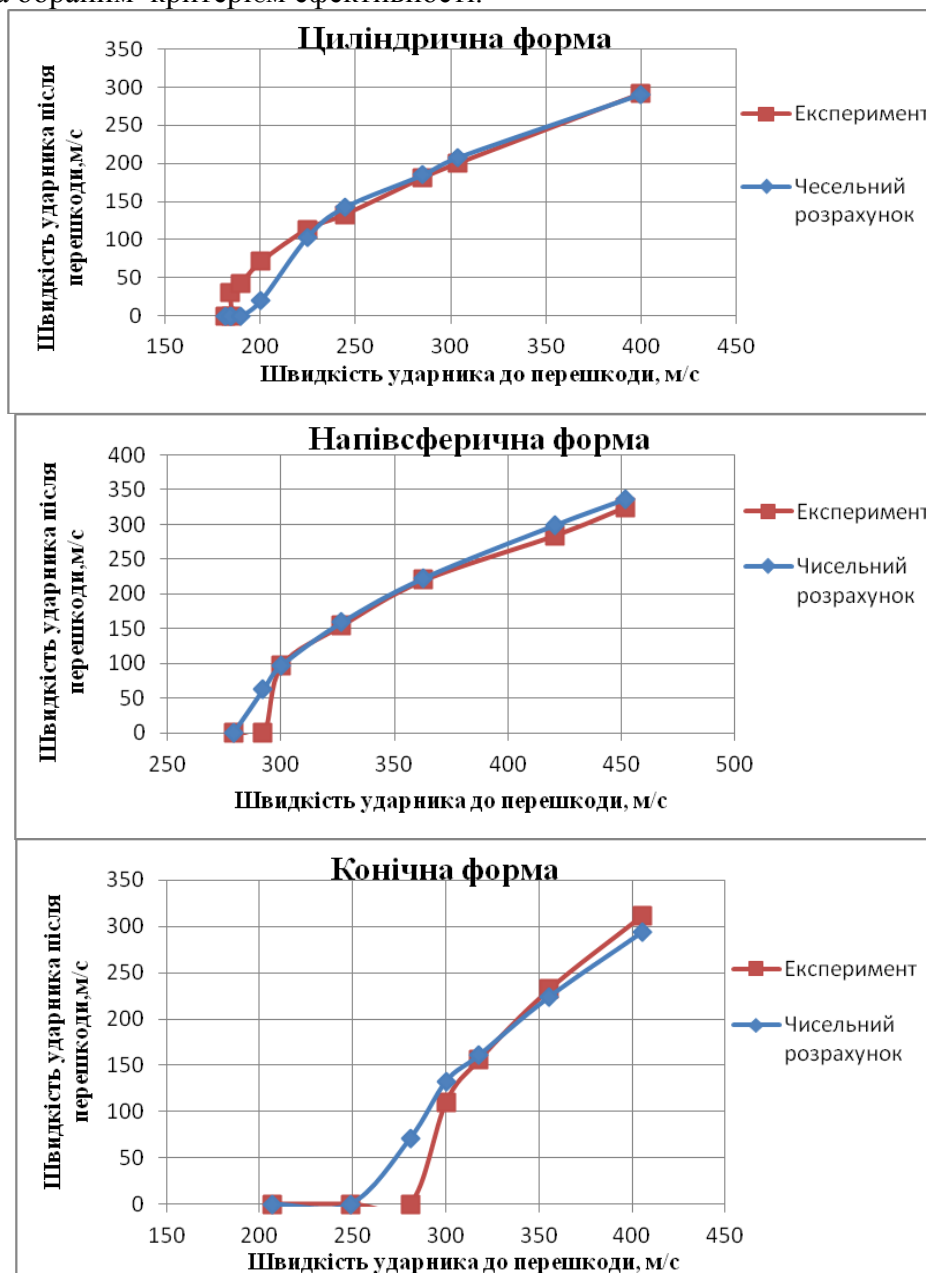


Рис.3-5. Порівняння значень залишкової швидкості ударника отриманих за допомогою експериментальних досліджень та чисельного моделювання

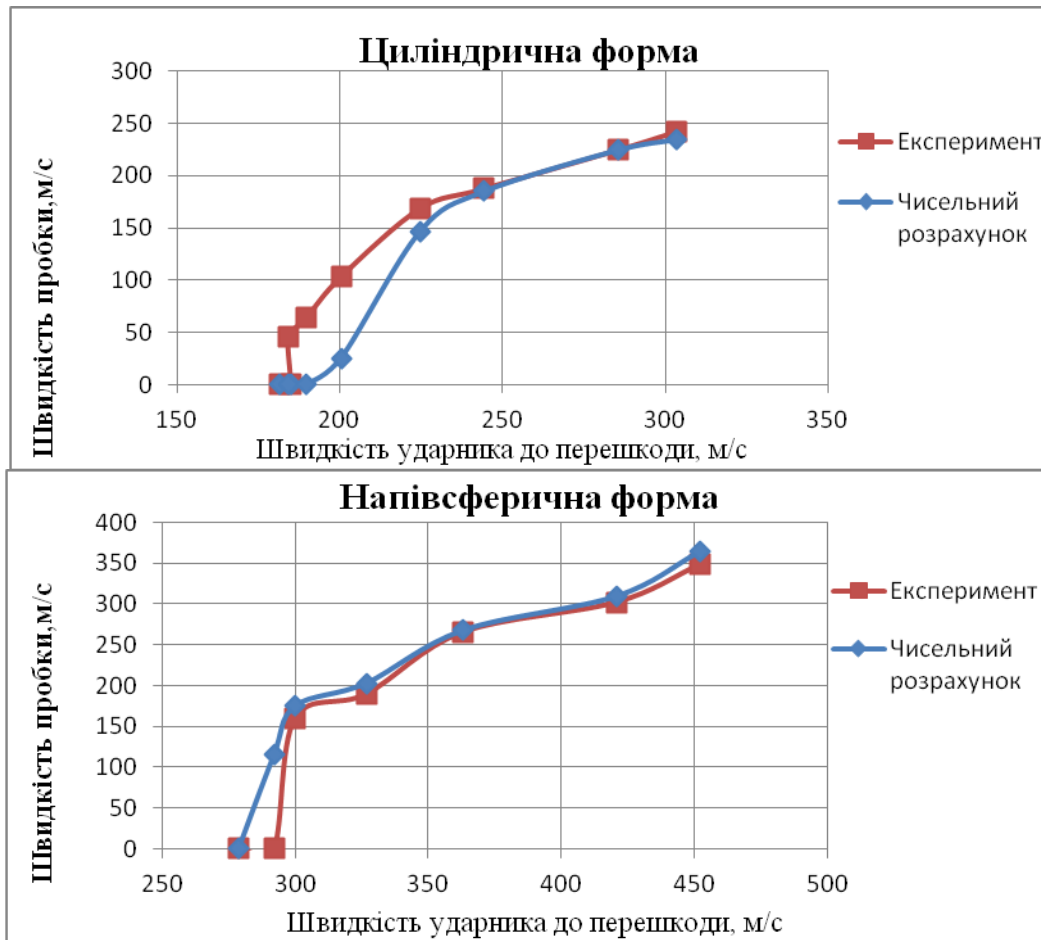


Рис.6-7 Порівняння значень швидкості пробки отриманих за допомогою експериментальних досліджень та чисельного моделювання

### Список літератури

1. T.Borvik. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. Part I: Experimental study./T.Borvik, M.Langseth, O.S. Hopperstad, K.A.Malo // International Journal of Impact Engineering 27 (2002) 19-35.
2. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0 Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций./ Рудаков К.Н. // К.: КПИ, 2011. – 317с.,ил.
3. Johnson GR., Cook WH. Fracture Characteristics of Three Metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // J EngMech. – Vol 21. – 1985. – P.31-48;
4. Hollquist J.O. LS-DYNA Theory manual./ March 2006
5. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.

Бісик Сергій Петрович - к.т.н., начальник науково-дослідної лабораторії, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України.

Бізер Антон Михайлович - молодший науковий співробітник, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України.