

О.А. КОСТРОМИЦЬКА

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОБИТТЯ МЕТАЛЕВИХ ТА МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ПЛАСТИН

Виконано чисельне параметричне моделювання пробивання алюмінієвої пластини сталеву кулею. Створена тривимірна модель, деформування пластини вважається пружно-пластичним. Далі моделюється пробивання керамічної пластини з металеву підложку. Розраховується металокерамічна двошарова мішень з різним співвідношенням товщини кераміки і стали. Будується двовимірний осесиметричний скінченно-елементний модель. Використовується модель крихкого руйнування Джонсона-Холмквіста. Проводиться порівняння отриманих скінченно-елементних рішень в ANSYS/LS-DYNA з наведеними в літературі.

Ключові слова: удар, проникнення, кераміка, пошкоджуваність, ANSYS/LS-DYNA.

Выполнено численное параметрическое моделирование пробивания алюминиевой пластины стальной пулей. Создана трехмерная модель, деформирование пластины считается упруго-пластическим. Далее моделируется пробивание керамической пластины с металлической подложкой. Рассчитывается металлокерамическая двухслойная мишень с различным соотношением толщины керамики и стали. Строится двумерная осесимметричная конечно-элементная модель. Используется модель хрупкого разрушения Джонсона-Холмквиста. Проводится сравнение полученных конечно-элементных решений в ANSYS/LS-DYNA с приведенными в литературе.

Ключевые слова: удар, проникновение, керамика, повреждаемость, ANSYS/LS-DYNA.

Numerical parametric simulation of penetration of aluminum plate by steel bullet is done. A three-dimensional model is constructed, the deformation of the plate is considered to be elastic-plastic. Further is modeling a projectile impacting on a ceramic layer backed by a metal plate. Is studied the two-layer metal-ceramic target with a different ratio of the thickness of the ceramic and steel. Is constructed a two-dimensional axisymmetric finite element Lagrangian model. The Johnson-Holmquist model of brittle fracture is used. Is simulated real boundary conditions of the system during penetration. Finite element models are prepared in Ansys, and key file is generated in the LS-DYNA. To locate the damaged section on impact is using thickening finite element mesh. To study the main stages of the bullets penetration into metal and metal-ceramic targets are used models, which provide visibility penetration. The main stages of bullet penetration and damage to a target are studied by analysis of plastic deformation and bullet velocity versus time. Also is studied absorption energy by the metal and metal-ceramic target. A comparison of the results of finite element solutions ANSYS / LS-DYNA with data reported in the literature is done.

Keywords: impact, penetration, ceramics, damage, ANSYS/LS-DYNA.

Вступ. Кераміка є важливим компонентом систем бронезахисту завдяки низькій щільності і високій твердості [1]. Розроблено досить багато динамічних моделей руйнування крихких матеріалів. Практично всі сучасні моделі використовують концепцію руйнування як процес зародження і розвитку в матеріалі пошкоджень (дефектів, тріщин і т.п.). Цей процес описується різними кінетичними рівняннями, побудованими на підставі тих чи інших механізмів руйнування [2-5]. Механічні характеристики деформованого матеріалу вважаються залежними від міри пошкоджуваності матеріалу, пов'язаної з історією зміни напружено-деформованого стану матеріальних частинок деформованого тіла.

Відгук кераміки залежить від розміру, швидкості, конструкції і матеріалу снаряда, матеріалу підложки, що підтримує кераміку, і механічних властивостей кераміки [6]. При простих умовах навантаження кераміка може розглядатися як пружно-крихкий матеріал. Однак, коли розглядається балістичний удар, велике значення має післяударна реакція матеріалу. Однією з найбільш відомих моделей стану, що описують наступну після удару реакцію кераміки, є модель JH-2, розроблена Джонсоном і Холмквістом (Johnson-Holmquist) [6]. Модель JH-2 являє собою рівняння стану, яке описує відгук матеріалу і включає пошкодження щодо залишкової міцності матеріалу і набу-

вання при руйнівному стисненні керамічного матеріалу. Модель інтегрована в поширені програмні комплекси LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN.

В останні десятиліття вивчається надзвичайно складна проблема снаряда, що ударяє по керамічній пластині з металеву підложку. Wilkins [7] і Florence [8] були в числі перших дослідників механіки проникнення композитної броні. Florence [8] розробив аналітичну модель для двокомпонентної броні. Модель передбачає жорстке керамічне облицювання і пластичну захисну пластину від впливу жорсткого снаряда. Модель забезпечує захист від проникнення снаряда і прогнозує балістичну межу швидкості. Woodward [9] пізніше запропонував одновимірну модель для проникнення снаряда в керамічну броню, використовуючи зосереджено-масовий підхід, який враховує ерозію як снаряда, так і мішені простим способом. Reijer [10] дав більш складну модель, яка передбачає ерозію снаряда, а також різні режими деформації для опорних (металевих) пластин. Ven-Dog та ін. [11] запропонували дещо модифіковану модель Florence шляхом введення коефіцієнта для того, щоб підвищити точність прогнозування.

Оскільки модель Florence продемонструвала задовільне узгодження з експериментальними даними [12-14], вона широко використовується в якості керівництва для оптимального проектування двокомпонен-

тної броні. На підставі цієї моделі Netherington [15] розробив рівняння для отримання оптимального співвідношення товщини передньої і задньої пластин, що забезпечує кращий захист для даної поверхневої щільності. Wang і Lu [16] запропонували критерій проектування для розрахунку оптимального співвідношення товщини таким чином, щоб забезпечити оптимальну продуктивність двокомпонентної керамічної броні для даної загальної товщини. Ben-Dog та ін. [11] представили оптимальне проектне рішення для двокомпонентної броні в безрозмірних змінних, в результаті чого всі характеристики снаряда і броні виражаються як функції двох змінних.

Пробиття металевої пластини. Перед тим, як розглядати пробиття металокерамічних пластин, логічним є розглянути процес пробиття металевих пластин.

При ударі кінетична енергія снаряда переходить в енергію пластини. Частина енергії використовується для деформації пластини. Інша частина енергії виділяється у вигляді світла і тепла, решта енергії передається фрагментам у вигляді кінетичної енергії. Вимірювання або знаходження кожної з цих енергій складно. Для аналізу пробивання основним аспектом є прогнозування кінетичної енергії (швидкості і маси) фрагментів.

Вплив напруг і деформацій при ударі зазвичай відчутний в межах 3-6 діаметрів снаряда ударної зони [17].

Процес пробивання при високошвидкісному ударі може бути представлений чотирма стадіями: перехідний процес, первинне проникнення, вторинне проникнення і відновлення [18]. *Перша, або перехідна, стадія* характеризується дуже коротким інтервалом часу прикладання тиску і відбувається, коли снаряд вперше контактує з поверхнею мішені. *Стадія первинного проникнення* описується як період, протягом якого снаряд діє як сила, що передає свою кінетичну енергію мішені гідродинамічним способом. *Стадія вторинного проникнення* (більш ніж одна стадія можуть відбуватися одночасно), яка іноді називається кавітацією, починається, коли снаряд повністю деформований і ефективно видаляється з системи в якості джерела енергії. Відзначається деформацією мішені, що не викликається безпосередньо матеріалом снаряда. Замість цього щільність енергії за ударною хвилею, що розширюється, продовжує деформувати матеріал мішені. *Четверта стадія, або відновлення*, відноситься до періоду, протягом якого кратер (воронка від снаряда) відновлюється або злегка стискається. Матеріал трохи нижче поверхні мішені (снаряд пробиває мішень зверху вниз) загартовується і рекристалізується.

Інша модель проникнення [19] подібна моделі ерозії, але має більш гідродинамічний характер. У цій моделі передній кінець снаряда і ударні поверхні моделюються як текуча рідина. Области безпосередньо за цими поверхнями потім моделюються як тверді тіла. Снаряд знищується від ударного краю у міру того, як проходить крізь матеріал мішені. Надалі це забезпечує, що велика частина випробувального матеріалу мішені зміщується вперед і назовні по ходу руху сна-

ряду протягом проникнення і що невелика кількість викидається в зворотному напрямку. Для опису руйнування матеріалу використовується критерій максимальної деформації.

Кінетична енергія снаряда витрачається на збільшення потенційної і кінетичної енергії пластини (мішені) і частина енергії втрачається у формі зруйнованого матеріалу:

$$E_{trans} = IE_{plate} + KE_{plate} + KE_{eroded} + IE_{eroded}, \quad (1)$$

де E , IE , KE – відповідно, повна, внутрішня і кінетична енергія; нижній індекс *trans* означає енергію, що передається, *plate* – пов'язану з пластиною енергію, верхній індекс *eroded* указує на еродовану, зруйновану масу.

Розрахунок пробиття металевої пластини. Розраховується пластина з матеріалу AL2024 T-3, матеріал кулі – інструментальна сталь.

Розрахунки проведені для пластини, яка точно поводить як в реальному сценарії [18, 20]. Щоб зрозуміти вплив співвідношення L/D (L – довжина і D – діаметр кулі), побудовано параметричну модель для різної товщини і співвідношень L/D . Мішенню при цьому є квадратна пластина, а куля являє собою циліндр. Фактичні розміри пластини з AL2024 T-3 взяті з [18]. Для локалізації пошкодженої ділянки при ударі використовується згущення скінченно-елементної (SE) сітки. Експериментальні дані взяті з [18].

Таблиця 1 – Властивості матеріалу AL2024 T-3 пластини

Параметр	Значення
Щільність, ρ	2780 кг/м ³
Модуль пружності, E	$73.1 \cdot 10^9$ Па
Коефіцієнт Пуассона, ν	0.3
Тангенціальний модуль, E_{tan}	$1.47 \cdot 10^9$ Па
Межа текучості, σ	$345 \cdot 10^6$ Па

Таблиця 2 – Властивості інструментальної сталі кулі

Параметр	Значення
Щільність, ρ	7924 кг/м ³
Модуль пружності, E	$210 \cdot 10^9$ Па
Коефіцієнт Пуассона, ν	0.28

Таблиця 3 – Розміри пластини

Параметр	Значення
Довжина	82.5 мм
Ширина	82.5 мм
Товщина	3.175 мм

Таблиця 4 – Розміри кулі

Параметр	Значення
Діаметр	7.5946 мм
L/D	0.713

Початкова швидкість кулі – 1115.8728 м/с [18]. Куля вважається жорстким тілом. Граничні умови – жорстке заземлення пластини по зовнішніх краях. Розглядається одна четверта частина моделі (рис.1), записуються умови симетрії.

Рис. 2-5 показують етапи впливу кулі на пластину, рис. 6 – зміну швидкості кулі і залишкову швидкість після пробиття пластини. На рис. 7, 8 представ-

лені кінетична енергія, яка втрачається снарядом через тертя, і зростання внутрішньої енергії мішені. Підвищення внутрішньої енергії мішені менше в порівнянні з втратою кінетичної енергії кулі. Результати отримані в ANSYS/LS-DYNA.

Визначення балістичної межі металевої пластини. Однією із задач, з якими стикаються при вивченні явищ зіткнення, є визначення граничної швидкості, нижче якої снаряд вже не в змозі пробити захисний пристрій навеліт.

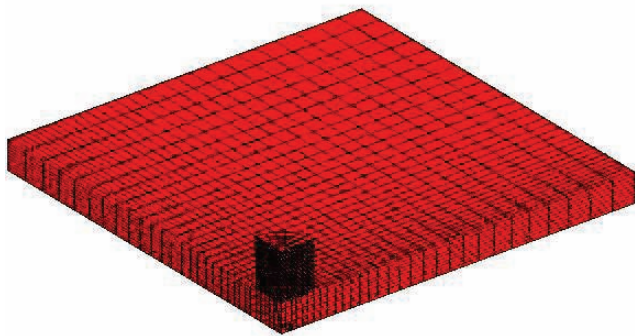


Рисунок 1 – Скінченно-елементна модель

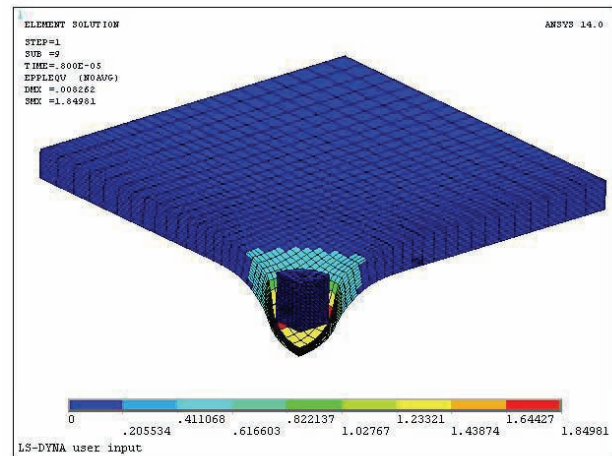


Рисунок 2 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.8 \cdot 10^{-5}$ с

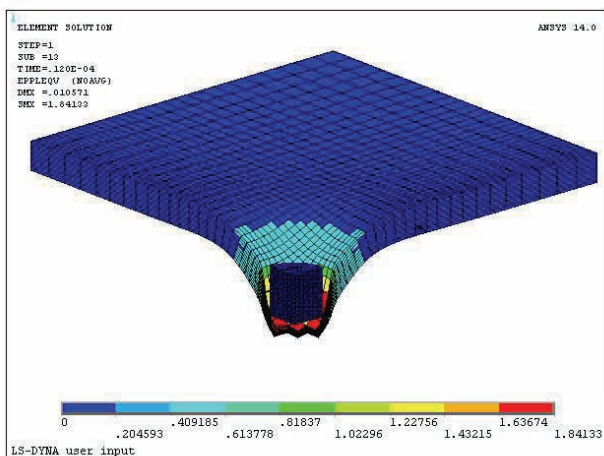


Рисунок 3 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.12 \cdot 10^{-4}$ с

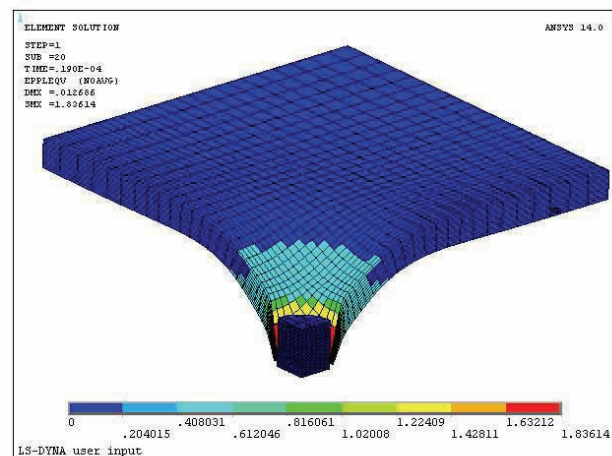


Рисунок 4 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.19 \cdot 10^{-4}$ с

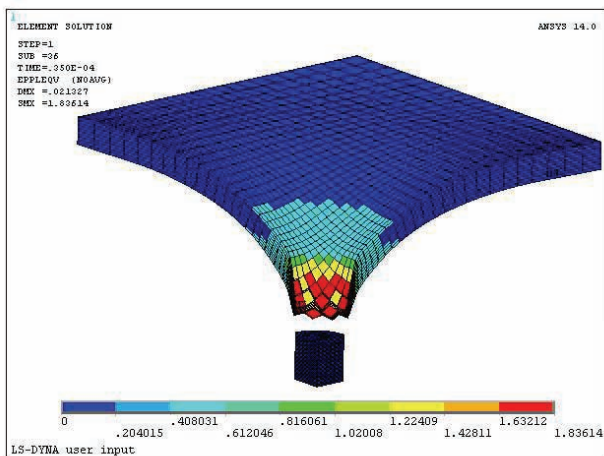


Рисунок 5 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.35 \cdot 10^{-4}$ с

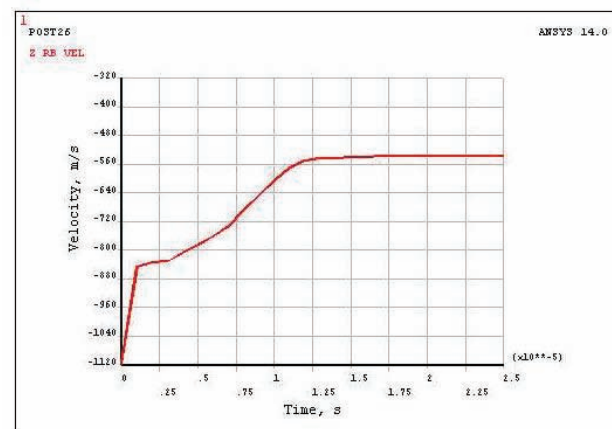


Рисунок 6 – Швидкість кулі, м/с

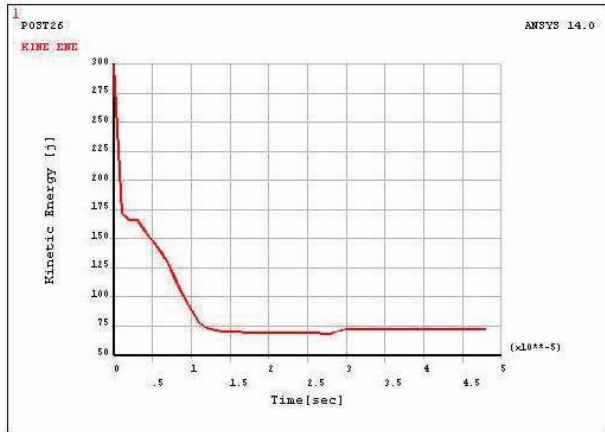


Рисунок 7 – Кінетична енергія кулі, Дж

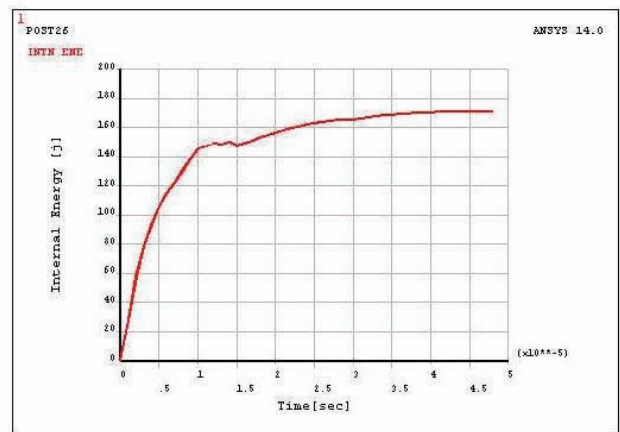


Рисунок 8 – Внутрішня енергія пластини, Дж

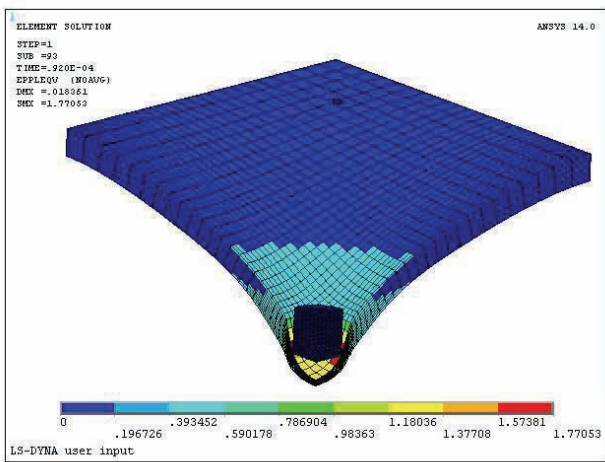


Рисунок 9 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.92 \cdot 10^{-4}$ с

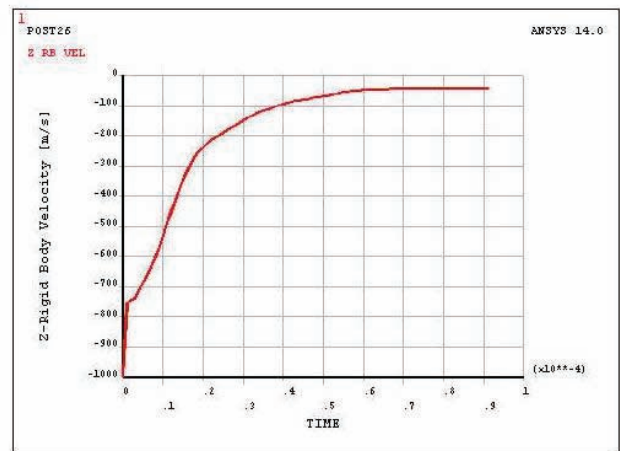


Рисунок 10 – Швидкість кулі, м/с

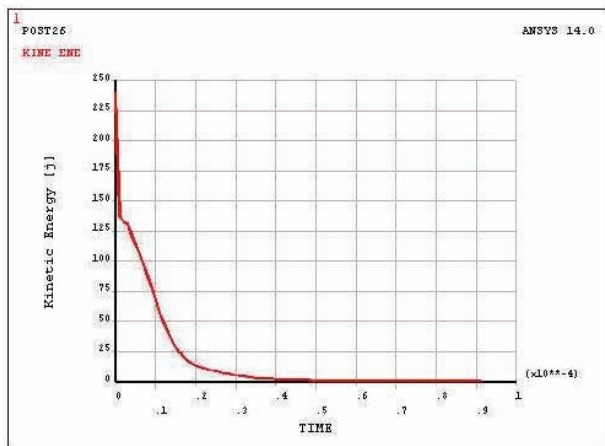


Рисунок 11 – Кінетична енергія кулі, Дж

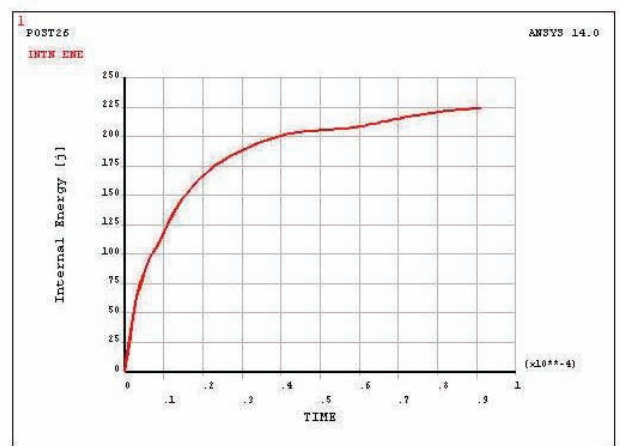


Рисунок 12 – Внутрішня енергія пластини, Дж

Проведено серію розрахунків для визначення балістичної межі для розглянутих мішені і кулі. Виявлено, що при швидкості 1000 м/с пластина не пробивається. Це узгоджується з результатом, наведеним в [18]. На рис. 9-12 наведені результати, що відповідають швидкості кулі, яка дорівнює балістичній межі (1000 м/с).

Порівняння з експериментальними даними. Значення залишкової швидкості кулі (після пробивання) в момент часу $3.19 \cdot 10^{-5}$ с (рис. 6) порівнюється з експериментальним значенням [18] в табл. 5.

Модель кераміки Джонсона-Холмквіста. Модель стану кераміки Джонсона-Холмквіста є першою запропонованою моделлю для опису відгуку крихкого

матеріалу на великі деформації. Перша версія моделі JH-1 [6] не допускає розвитку пошкоджуваності матеріалу. Міцність матеріалу представляється декількома лінійними ділянками, відповідними певним режимам тиску і пошкоджуваності. Існує також Johnson-Holmquist-Beissel модель (JHB). Ця модель аналогічна моделі JH-1, обидві мають дискретну модель ушкодження. Друга версія моделі Джонсона-Холмквіста, відома як JH-2, подає міцність і пошкоджуваність матеріалу як функції деяких змінних і, що більш важливо, враховує зміну пошкоджуваності матеріалу. Модель JH-2 також включає нормування міцності параметрів за допомогою Гюгоніівської (динамічної) межі пружності для прямого порівняння різних матеріалів.

Таблиця 5 – Порівняння з експериментом

Початкова швидкість кулі (з [18]), м/с	Експериментальна залишкова швидкість (м/с)	Розрахункова залишкова швидкість (м/с)	Похибка (%)
1115.9	545.90	546.95	0.19

Пошкодження кераміки починається в формі дрібних тріщин, які ростуть і зливаються, утворюючи дроблення матеріалу [2]. Однак, моделювання початку і розвитку пошкодження на цьому рівні визнано чисельно непрактичним і в деякій мірі непотрібним. Пошкоджуваність в моделі JH-2 подається за допомогою змінної стану damage, відповідної середньої пошкоджуваності в межах конкретного об'єму матеріалу скінченного елемента. Міцність матеріалу і, отже, пошкоджуваність - обидві є функціями тиску в даному місці матеріалу.

У моделі JH-2 межа міцності кераміки в процесі її руйнування змінюється від межі міцності неушкодженого матеріалу до повністю зруйнованого (подрібненого) матеріалу. Межа міцності крихкого матеріалу описується рівнянням:

$$\sigma^* = \sigma_0^* - D(\sigma_0^* - \sigma_f^*), \quad (2)$$

де D – пошкоджуваність ($0 \leq D \leq 1$), при цьому

$$\sigma_0^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3)$$

визначає поведінку неушкодженого матеріалу, а матеріал, що руйнується, описується так:

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq SF \max. \quad (4)$$

В рівняннях (3), (4) A, B, C, M, N – константи матеріалу, $SF \max$ – максимальна нормована межа міцності зруйнованої кераміки, $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ – нормована швидкість деформації, $\dot{\epsilon}$ – елементарна швидкість деформації за один крок обчислень, $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ c}^{-1}$ – еталонна швидкість деформації. Верхній індекс «*» означає безрозмірну, нормовану величину. Величина $P^* = P/P_{HEL}$ – безрозмірний тиск, P_{HEL} – тиск, при якому матеріал переходить з пружного в пружно-пластичний стан після удару (рис. 13), HEL – Гюгоніівська межа пружності (межа пружності на ударній адиабаті матеріалу).

Величина $T^* = T/P_{HEL}$ – безрозмірне максималь-

не напруження всебічного розтягнення, яке може витримати матеріал без руйнування. $\sigma^*, \sigma_0^*, \sigma_f^*$ нормалізовані еквівалентною напругою на Гюгоніівській межі пружності, наприклад: $\sigma^* = \sigma/\sigma_{HEL}$.

Межа міцності зруйнованої кераміки σ_f^* (4) обмежена зверху величиною $SF \max = g \cdot HEL$, де g – константа.

Хоча модель JH-2 враховує ефекти швидкості деформації, ці ефекти другорядні в порівнянні з ефектами тиску. Це помічено в експериментах і відображено в типових значеннях констант A, B, C, M, N моделі JH-2.

На основі прирощень поточної деформації і часу можна обчислити сумарну деформацію і поточну ефективну швидкість деформації. Для визначення поточного прирощення пластичної деформації $\Delta \epsilon^p$ може бути використана (за методом радіального повернення) поточна межа міцності (2). Пошкоджуваність визначається як відносна накопичена пластична деформація

$$D = \sum \Delta \epsilon^p / \epsilon_f^p, \quad (5)$$

де $\Delta \epsilon^p$ – елементарна пластична деформація (приріст пластичної деформації за один крок обчислень), ϵ_f^p – умовна гранична пластична деформація руйнування при постійному тиску P . При обчисленні ϵ_f^p враховується те, що, по-перше, дія напруг, що стискають, призводить до деякого зміцнення крихких матеріалів, і, по-друге, руйнування крихких матеріалів може відбуватися під дією як напруг, що розтягують, так і тих, що стискають:

$$\epsilon_f^p = D_1(P^* + T^*)^{D_2}, \quad (6)$$

тут D_1, D_2 – константи. Параметр D_1 контролює швидкість, при якій накопичується пошкоджуваність. Якщо цей параметр дорівнює нулю, повне пошкодження відбувається за один крок за часом, тобто миттєво.

Приріст пошкоджуваності $\Delta D = \Delta \epsilon^p / \epsilon_f^p$ веде до набухання матеріалу, тобто збільшення об'єму матеріалу, що руйнується, в порівнянні з незруйнованим в початковому стані. Обмеження матеріалу веде до локального підвищення тиску. Тиск набухання дорівнює нулю в недеформованому матеріалі. Для недеформованого матеріалу гідростатичний тиск визначається як

$$P = k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3 \quad (7)$$

при стисканні і

$$P = k_1 \mu \quad (8)$$

при розтягуванні, де $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ_0 – початкова і ρ – фінальна щільність матеріалу, k_1, k_2, k_3 – константи.

Коли починається пошкодження, тиск збільшується. Частина β , $0 \leq \beta \leq 1$, пружної енергії зменшується і перетворюється в гідростатичну потенційну енергію, що приводить до тиску стиснення. Знаючи HEL і g, μ_{HEL} можна знайти ітеративно з формули:

$$HEL = k_1 \mu_{HEL} + k_2 \mu_{HEL}^2 + k_3 \mu_{HEL}^3 + (4/3)g(\mu_{HEL}/(1 + \mu_{HEL})) \quad (9)$$

і, в подальшому, для нормування величин гідростати-

чного тиску і напруги знаходяться

$$P_{HEL} = k_1 \mu_{HEL} + k_2 \mu_{HEL}^2 + k_3 \mu_{HEL}^3, \quad (10)$$

$$\sigma_{HEL} = 1.5(HEL - P_{HEL}). \quad (11)$$

Пробиття металокерамічної пластини. Параметрично моделюється проникнення кулі в мішень з різним співвідношенням товщини кераміки і сталі за допомогою ANSYS/LS-DYNA. Для дослідження обрані керамічна (AlN) пластинка з металевою підложкою зі сталі і сталева куля відповідно до [21]. Представлені в [21] результати потім порівнюються з отриманими в даній роботі.

Побудовано двовимірну осесиметричну SE модель Лагранжа. Ескіз кулі, керамічного і металевого шарів показаний на рис. 14. Використовується 2D-осесиметричний квадратичний елемент з чотирма вузлами з у – віссю симетрії. Скінченні елементи кулі і керамічного блоку мають розмір 0.5×0.5 мм, а для металевого матеріалу розмір елемента 0.5 мм×0.2 мм. SE модель використовує реальні граничні умови системи

під час пробиття. Нульові значення задаються для переміщень в напрямку z і обертань в x- і y-напрямку для всіх елементів, а краї керамічних і металевих шарів фіксуються. Задається початкова швидкість.

Для керамічного матеріалу використовується модель крихкого руйнування JH-2. Параметри керамічного (AlN) матеріалу наведені в табл. 6.

Щоб охарактеризувати пластичну поведінку матеріалу при високому тиску, пластивому високо динамічним процесам, використовується співвідношення між гідростатичним тиском, локальною щільністю (або питомим об'ємом) і місцевою питомою енергією. У даній роботі для опису поведінки сталевго шару мішені (рис. 14) використовується рівняння стану Мі-Грюнайзена (Mie-Gruneisen EOS). Базова крива для рівняння стану Мі-Грюнайзена (табл. 7) для твердих матеріалів - адиабата Гюгоньо. Крім того для опису поведінки сталевго підложки використовується рівняння Джонсона-Кука (Johnson-Cook), що враховує ефекти зміцнення, швидкості деформації та температури в механічній поведінці (табл. 8).

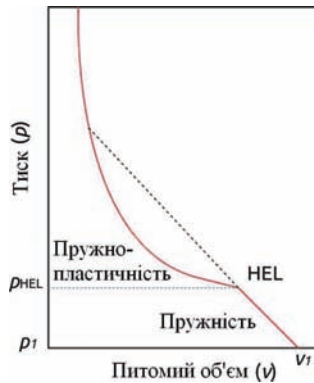


Рисунок 13 – Ударна адиабата матеріалу

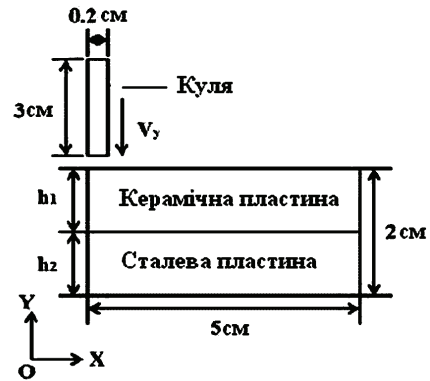


Рисунок 14 – Геометрична модель кулі і металокерамічної пластини

Таблиця 6 – Параметри кераміки (AlN) для моделі JH-2

Density	Elastic Constants		Damage Constants			Equation of State				
ρ (kg/m ³)	G(GPa)	K(GPa)	D1	D2	K1(GPa)	K2(GPa)	K3(GPa)	β		
3226	127	201	0.02	1.85	201	260	0	1.0		
Strength Constants										
HEL (GPa)	σ_{HEL} (GPa)	P_{HEL} (GPa)	T	T*	A	B	C	N	M	σ^*f_{max}
9.0	6.0	5.0	0.32	0.064	0.85	0.31	0.013	0.29	0.21	N/A

Таблиця 7 – Параметри сталі пластини для рівняння Мі-Грюнайзена

C	S1	S2	S3	GAMAO	A	EO	VO
0.4569	1.49	0	0	2.17	0.46	0	1.0

Таблиця 8 – Параметри сталі пластини для рівняння Джонсона-Кука (JC)

Density ρ (g/cm ³)		Shear modulus G(100GPa)				D5	C2/P
7.80		0.77				0	0
A	B	N	C	M	TM	TR	EPSO
0.00792	0.0051	0.26	0.014	1.03	1793	294	1.0E-6
CP	PC	SPALL	IT	D1	D2	D3	D4
4.77E-6	-9	3.0	0	3.0	0	0	0

Таблиця 9 – Властивості сталі кулі

Density ρ (g/cm ³)	Elastic modulus E(GPa)	Poisson ratio ν	Yield stress σ_s (GPa)	Tangent modulus σ_t (GPa)	Beta β
7.65	200	0.29	1.6	80	1.0

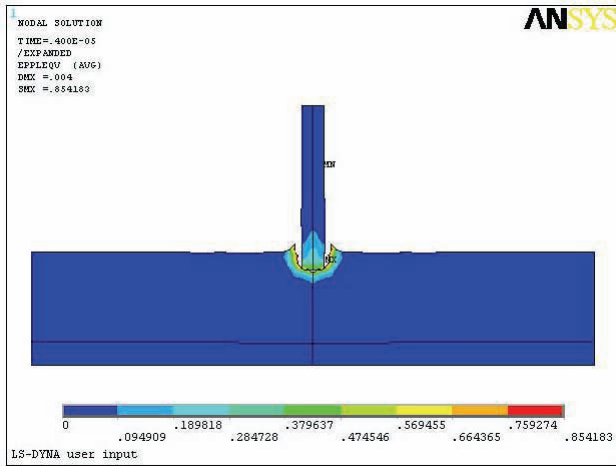


Рисунок 15 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.4 \cdot 10^{-5}$ с

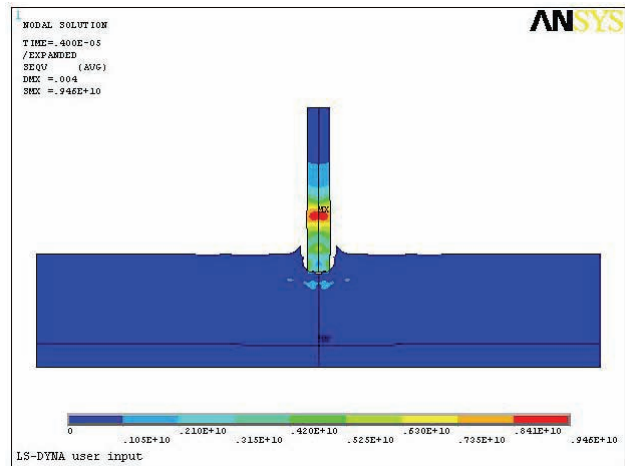


Рисунок 16 – Еквівалентні напруги по Мізесу Seqv, Па для $t = 0.4 \cdot 10^{-5}$ с

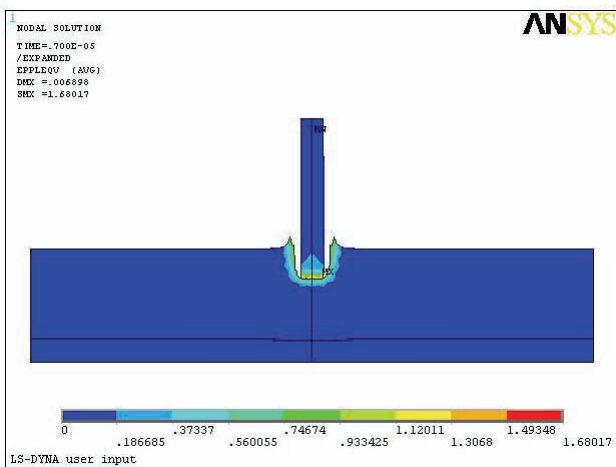


Рисунок 17 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.7 \cdot 10^{-5}$ с

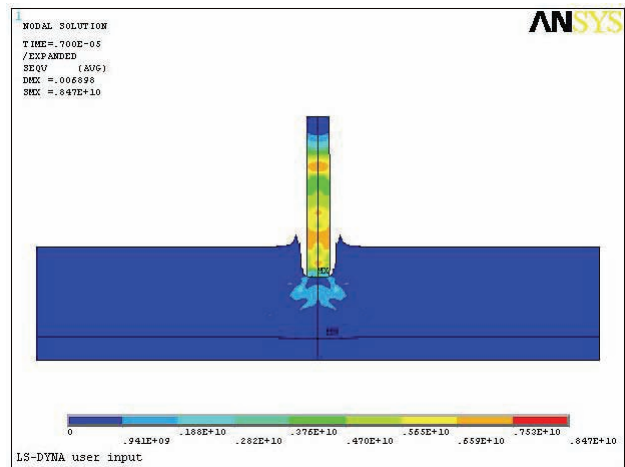


Рисунок 18 – Еквівалентні напруги по Мізесу Seqv, Па для $t = 0.7 \cdot 10^{-5}$ с

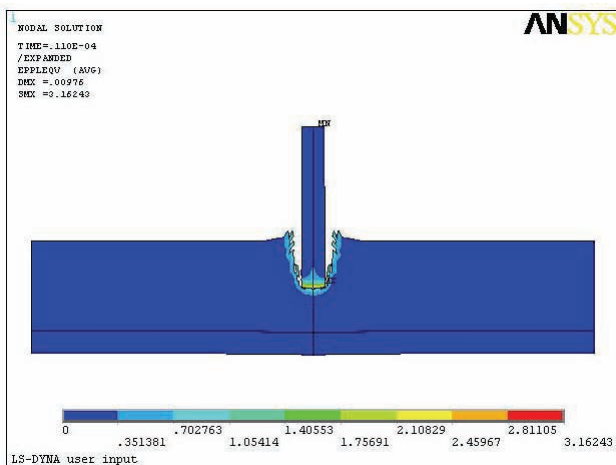


Рисунок 19 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.11 \cdot 10^{-4}$ с

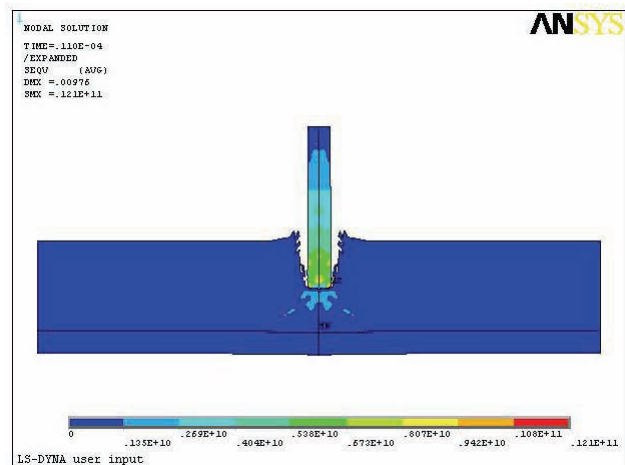


Рисунок 20 – Еквівалентні напруги по Мізесу Seqv, Па для $t = 0.11 \cdot 10^{-4}$ с

Для сталевій кулі підходить моделювання її матеріалу як ізотропного пластичного матеріалу з кінематичним зміцненням і можливістю включення ефектів швидкості (табл. 9).

В LS-DYNA перераховані вище матеріали і рівняння стану ϵ вбудованими: *Mat_Johnson_Holmquist_Ceramics (параметри відпо-

відно табл. 6), *Mat_Johnson_Cook (табл. 7), *EOS_Gruneisen (табл. 8), *Mat_Plastic_Kinematic (табл. 9).

Результати розрахунку пробивання металокерамічної пластини. На рис. 15-22 представлено еквівалентні пластичні деформації та еквівалентні напруги по Мізесу для різних моментів часу проникнення кулі

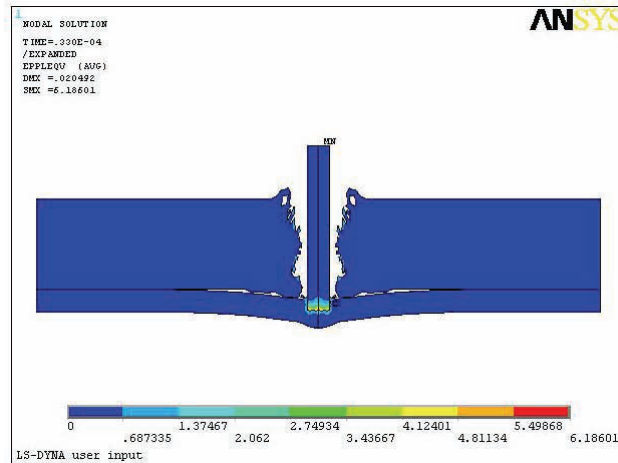


Рисунок 21 – Еквівалентні пластичні деформації EPPL для $t = 0.33 \cdot 10^{-4}$ с

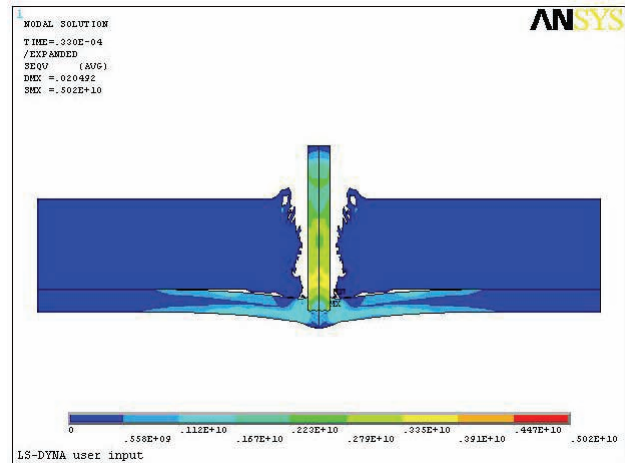


Рисунок 22 – Еквівалентні напруги по Мізесу Seqv, Па для $t = 0.33 \cdot 10^{-4}$ с

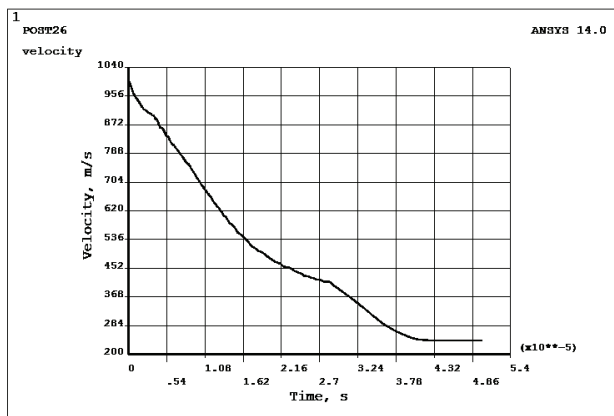


Рисунок 23 – Швидкість кулі, м/с

через металокерамічну мішень. Рис. 23 показує зміну швидкості при проникненні кулі в металокерамічну мішень. Отримані результати досить добре збігаються з наведеними в [21].

Висновки. В роботі досліджуються проникаючі удари по металевим та металокерамічним пластинам за допомогою CE параметричного моделювання в ANSYS/LS-DYNA. Отримані результати добре збігаються з опублікованими експериментальними і розрахунковими даними. Використані методики дозволяють розраховувати конкретні, що мають практичний інтерес, моделі елементів бронезахисту.

Список літератури:

1. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: в 4 т. / Под ред. В.В. Панасюка. – К.: Наукова думка. Т. 1: 1988. – 488 с.; Т. 2: 1988. – 620 с.; Т. 3: 1988. – 436 с.; Т. 4: 1990. – 680 с.
2. Meyers M.A. Dynamic Behavior of Materials / M.A. Meyers. – John Wiley & Sons Inc., Canada, 1994.
3. Johnson G.R. A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates and high pressures / G.R. Johnson, T.J. Holmquist // Shock-wave and High-strain Rate Phenomena in Materials. – New York, 1992. – P. 1075-1081.
4. Ravid M. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing / M. Ravid, S.R. Bodner, I.S. Chochron // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. – Interlaken, Switzerland, 2001.
5. Поведение керамической брони при ударном воздействии пули. Режим доступа: <http://materialy-bronirovaniya.ru/keramicheskaya-bronya/povedenie-keramicheskoi-broni-udarnom-vozdeistvii-pul>.
6. Cronin S. Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna / S. Cronin, K. Bui, C. Kaufmann, C. McIntosh, T. Berstat // 4th European LS-Dyna Users Conference, Waterloo 2008.
7. Wilkins M.L. Mechanics of penetration and perforation / M.L. Wilkins // Int J Eng Sci. – 1978. – № 16. – P. 793–807.
8. Florence A. L. Interaction of projectiles and composite armour, Part II / A. L. Florence // Standford Research Institute

Menlo Park California AMMRC-CR-69-15 August 1969.

9. Woodward R. L. A basis for modelling ceramic composite armour defeat / R. L. Woodward // Material research laboratory DSTO Ascot Vale Victoria, Australia MRL-RR-3-89, 1989.
10. Den Reijer P.C. Impact on ceramic faced armour. / P.C. Den Reijer // Ph.D. thesis Delft Univ Tech Delft, The Netherlands, 1991.
11. Ben-Dor G. Optimisation of two-component ceramic armor for a given impact velocity / G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin, N. Frage // Theor Appl Fract Mech. – 2000. – № 33. – P. 185-190.
12. Prior A. M. The ballistic impact of small calibre ammunition on ceramic composite armour / A. M. Prior // Ph.D. thesis RMCS Shrivenham, 1988.
13. Gagne M.P. The penetration mechanics of small arms projectiles in ceramic-faced vehicle armours / M.P. Gagne // 16 MVT Course RMCS Shrivenham UK, 1989.
14. Rajagopalan B. P. The experimental validation of an analytical model for use in composite armour design / B. P. Rajagopalan // 17 MVT Course RMCS Shrivenham UK, 1989.
15. Hetherington J.G. The optimization of two-component composite armors / J.G. Hetherington // Int J Impact Eng. – 1992. – № 12. – P. 409-414.
16. Wang B. On the optimization of two-component plates against ballistic impact / B. Wang, G. Lu // J Mater Process Tech. – 1996. – № 57. – P. 141-145.
17. Zook J. An Analitical Model of Kinetic Energy Projectile/Fragment Penetration / J. Zook // U.S.A. Ballistic Reserch

Laboratory, BRL MR 2797, Aberdeen Proving Grounds, MD, Oct. 1977.

18. Sai Kiran Chelluru Finite element simulations of ballistic impact on metal and composite plates / Sai Kiran Chelluru. – Wichita State University, 2007, 114 p.

19. Blythe R. M. Preliminary Empirical Characterization of Steel Fragment Projectile Penetration of Graphite / R. M. Blythe // Epoxy Composite and Aluminum Target. Flight Dynamics Directorate, Wright Laboratory, WL-TR-94-3046, Wright-Patterson, 1994.

20. Staley T. Finite Element Simulation of Ballistic Impact in Survivability Studies / T. Staley, J. Baker // 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Material Conference 19-22 April 2004, Palm Springs, California.

21. Mei H. Numerical investigation on anti-penetration behavior of ceramic/metal target under ballistic impact / H. Mei, Y. C. Wang, X. Liu, D. F. Cao, L. S. Liu // Journal of Physics: Conference Series 419 (2013) 012054. doi:10.1088/1742-6596/419/1/012054.

Bibliography (transliterated):

1. Mehanika razrusheniya i prochnost' materialov: Spravochnoe posobie: v 4 t. Fracture mechanics and strength of materials: Handbook: in 4 vol. / Pod red. V.V. Panasjuka. Kiev, Naukova Dumka. T. 1: 1988, 488 p. T. 2: 1988, 620 p. T. 3: 1988, 436 p. T. 4: 1990, 680 p.

2. Meyers M.A. Dynamic Behavior of Materials. John Wiley & Sons Inc., Canada, 1994.

3. Johnson G.R., Holmquist T.J. A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates and high pressures. Shock-wave and High-strain Rate Phenomena in Materials, New York, 1992, pp. 1075-1081.

4. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing. Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland, 2001.

5. Povedenie keramicheskoy broni pri udarnom vozdejstvii pul'. The behavior of the ceramic armor on impact of bullets. <http://materialy-bronirovaniya.ru/keramicheskaya-bronya/povedenie-keramicheskoy-broni-udarnom-vozdejstvii-pul>.

6. Cronin S., Bui K., Kaufmann C., McIntosh C., Berstat T. Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna. 4th European LS-Dyna Users Conference, Waterloo 2008.

7. Wilkins M.L. Mechanics of penetration and perforation.

Int J Eng Sci, 16, 1978, pp. 793-807.

8. Florence A.L. Interaction of projectiles and composite armour, Part II. Stanford Research Institute Menlo Park California AMMRC-CR-69-15 August 1969.

9. Woodward R.L. A basis for modelling ceramic composite armour defeat. Material research laboratory DSTO Ascot Vale Victoria, Australia MRL-RR-3-89, 1989.

10. Den Reijer P.C. Impact on ceramic faced armour. Ph.D. thesis Delft Univ Tech Delft, The Netherlands, 1991.

11. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T., Frage N. Optimisation of two-component ceramic armor for a given impact velocity. Theor Appl Fract Mech, 33, 2000, pp. 185-190.

12. Prior A.M. The ballistic impact of small calibre ammunition on ceramic composite armour. Ph.D. thesis RMCS Shrivenham, 1988.

13. Gagne M.P. The penetration mechanics of small arms projectiles in ceramic-faced vehicle armours. 16 MVT Course RMCS Shrivenham UK, 1989.

14. Rajagopalan B.P. The experimental validation of an analytical model for use in composite armour design. 17 MVT Course RMCS Shrivenham UK, 1989.

15. Hetherington J.G. The optimization of two-component composite armors Int J Impact Eng, 12, 1992, pp. 409-414.

16. Wang B., Lu G. On the optimization of two-component plates against ballistic impact J Mater Process Tech, 57, 1996, pp. 141-145.

17. Zook J. An Analytical Model of Kinetic Energy Projectile/Fragment Penetration. U.S.A. Ballistic Research Laboratory, BRL MR 2797, Aberdeen Proving Grounds, MD, Oct. 1977.

18. Sai Kiran Chelluru Finite element simulations of ballistic impact on metal and composite plates. Wichita State University, 2007, 114 p.

19. Blythe R.M. Preliminary Empirical Characterization of Steel Fragment Projectile Penetration of Graphite/Epoxy Composite and Aluminum Target. Flight Dynamics Directorate, Wright Laboratory, WL-TR-94-3046, Wright-Patterson, 1994.

20. Staley T., Baker J. Finite Element Simulation of Ballistic Impact in Survivability Studies. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Material Conference 19-22 April 2004, Palm Springs, California.

21. Mei H., Wang Y.C., Liu X., Cao D.F., Liu L.S. Numerical investigation on anti-penetration behavior of ceramic/metal target under ballistic impact. Journal of Physics: Conference Series 419 (2013) 012054. doi:10.1088/1742-6596/419/1/012054.

Надійшла (received) 15.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комп'ютерне моделювання процесів пробиття металевих та металокерамічних пластин / О.А. Костромицька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 46 (1218). – С. 26–34. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2078-9130.

Компьютерное моделирование процессов пробития металлических и металлокерамических пластин / О.А. Костромицкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 46 (1218). – С. 26–34. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2078-9130.

Computer modeling of processes penetration of metal and metal-ceramic plates / O. Kostromitskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 46 (1218). – P. 26–34. – Bibliogr.: 21. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костромицька Ольга Анатоліївна, науковий співробітник кафедри динаміки та міцності машин, НТУ «ХПІ», тел. (057)-70-76-879, e-mail: kostrom_olga@ukr.net

Костромицкая Ольга Анатольевна, научный сотрудник кафедры динамики та прочності машин, НТУ «ХПІ», тел. (057)-70-76-879, e-mail: kostrom_olga@ukr.net

Kostromitskaya Olga Anatoliivna, Researcher of the Department of Dynamics and Strength of Machines, NTU «KhPI», tel. (057)-70-76-879, e-mail: kostrom_olga@ukr.net