

УДК 531.66

РОЗРАХУНОК БРОНЕСТІЙКОСТІ МЕТАЛЕВИХ БАГАТОШАРОВИХ БРОНЬОВАНИХ СТРУКТУР ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Д.С. Баулін¹,канд. техн. наук, старший науковий співробітник¹С.А. Манжура¹,М.П. Одейчук²,канд. техн. наук, старший науковий співробітник²А.М. Одейчук²,канд. техн. наук, старший науковий співробітник²С.А. Горслишев¹,канд. техн. наук, доцент¹М.І. Ільченко²

¹Національна академія Національної гвардії України, Харків, майдан захисників України 3, м. Харків, 61001

²Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут", Харків, вулиця Академічна, 1, м. Харків, 61008

DOI: 10.32347/2410-2547.2019.103.145-164

В той час, коли могутність сучасних засобів кінетичного ураження постійно зростає, традиційні металургійні і матеріалознавчі підходи до виробництва гомогенного (однорідного) листового прокату з броньових сталей вже не в змозі забезпечити високу динамічну стійкість без значного збільшення товщини броні і, відповідно, маси бронезахисної структури в цілому. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми можливо за рахунок використання багатошарових металевих композитів. Об'єднання у композиті шарів високотвердої (але крихкої) і м'якої (але в'язкої) сталей забезпечує композитам таке поєднання твердості і в'язкості, яке неможливо досягти за традиційними методами виготовлення гомогенних броньових сталей (властивість емерджентності).

В даній роботі розглянуто процес взаємодії високошвидкісного вражаючого елемента з захисними багатошаровими броньованими перешкодами, які створені шляхом зварювання шарів композиту у твердій фазі (без розплавлення) за вакуумно-деформаційною методикою.

Досліджено механізм використання методу скінчених елементів для розрахунку бронестійкості захисних перешкод. Вибрані та обгрунтовані вихідні дані для імітаційного моделювання. Для моделювання фізичних явищ, що відбуваються у вражаючому елементі та перешкоді, таких як деформаційне і швидкісне зміцнення, температурне зменшення, руйнування і т.і., використовувались моделі поведінки матеріалів, які, в загальному випадку, складаються з трьох основних елементів: рівняння стану (equation of state), моделі пластичності (plasticity model) і моделі руйнування (damage model).

Отримані результати розрахунку бронестійкості двошарової бронепластины наступної структури: перший шар (фронтальний) – інструментальна вуглецева сталь з твердістю HRC 60 одиниць товщиною 6 мм, другий (тильний) – сталь з твердістю HRC 40 одиниць товщиною 4 мм при впливі удару високошвидкісного вражаючого елемента. Розглянуто вплив особливостей технології з'єднання шарів на поведінку швидкості центру мас і dna вражаючого елемента та розподілу еквівалентного напруження по Мізесу. Подальші дослідження пов'язані з отриманням залежності бронестійкості багатошарових бронепластин від їх загальної товщини та структури (складу та співвідношення шарів), що дозволить сформулювати рекомендації для вибору захисних структур.

Ключові слова: модель, бронестійкість, високошвидкісний вражаючий елемент, захисна багатошарова перешкода, зварювання у твердій фазі, деформація.

© Баулін Д.С., Манжура С.А., Одейчук М.П., Одейчук А.М., Горслишев С.А., Ільченко М.І.

Постановка проблеми. Розробка ефективних засобів захисту є складною задачею, яка враховує велике число тактико-технічних вимог і чинників, що впливають на бойову ефективність, і які суперечать один одному. Відсутність на сьогоднішній день систематизованих рекомендацій щодо обґрунтування застосування матеріалів для виготовлення бронееlementів не дозволяють вирішувати цю проблему в повному обсязі.

Традиційні металургійні і матеріалознавчі підходи до виробництва гомогенного (однорідного) листового прокату з броньових сталей практично вичерпали свої можливості. В той час, коли могутність сучасних засобів кінетичного ураження постійно зростає, ці підходи вже не в змозі забезпечити високу динамічну стійкість без значного збільшення товщини броні і, відповідно, маси бронезахисної структури в цілому. Це твердження базується на тому факті, що за останні 20-30 років в світі не запропоновано жодного нового складу броньових сталей, принципово відмінного від вже відомих, внаслідок чого з'явилась би можливість виготовляти сталі зі значно вищими функціональними характеристиками порівняно з традиційними гомогенними бронесталлями. Крім того, створення броньових сталей досить витратне й вимагають фахівців високої кваліфікації.

Одним з напрямків вирішення цієї проблеми можливо за рахунок використання багатошарових металевих композитів. Об'єднання у композиті шарів високотвердої (але крихкої) і м'якої (але в'язкої) сталей забезпечує композитам таке поєднання твердості і в'язкості, яке неможливо досягти за традиційними методами виготовлення гомогенних броньових сталей (властивість емерджентності). Це надає таким композитам значно вищу балістичну стійкість у порівнянні з гомогенними сталлями.

Перспективним способом виробництва металевих композитів виявився метод виготовлення двошарового листового прокату за допомогою зварювання двох заготовок в процесі прокатки, вперше випробуваний в США [1]. У Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут" створена оригінальна розробка зварюванням шарів композиту у твердій фазі (без розплавлення) за вакуумно-деформаційною методикою, яка не має світових аналогів.

Інтенсивні розробки броньованих структур для засобів захисту вимагають нових методів, що дозволять прогнозувати балістичні властивості матеріалів, встановлювати зв'язки між структурними фізико-хімічними та балістичними характеристиками, а також проводити докладне якісне порівняння матеріалів, чий балістичні характеристики досить близькі. На даний час існуючий науково-методичний апарат не дозволяє з достатньою ефективністю оцінювати параметри існуючих багатошарових бронееlementів. Тому удосконалення існуючих і розробка нових методів оцінювання бронестійкості багатошарових бронееlementів, які враховують особливості технологічних процесів виготовлення є актуальною і практично значущою науковою задачею. У зв'язку з цим на перший план висувається потреба в створенні надійних, досить універсальних і алгоритмічних простих для реалізації на сучасній комп'ютерній техніці методів розрахунку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Єдиних методик, що дозволяють прогнозувати балістичні властивості матеріалів, на даний час не сформульовано, проте в іноземній і вітчизняній літературі представлений досвід окремих дослідників [2-4].

Дослідження [5-8] в області комбінованих бронематеріалів вказують на те, що їх найважливіші механічні властивості, такі як міцність при розтягуванні і стисненні, твердість і зносостійкість, залежать від характеристик мікроструктури. У роботах [9,10] розглядалися залежності характеристик бронеструктур з використанням кераміки на основі алюмінію від розміру та форми їх структурних складових. В цих дослідженнях розглядалися тільки статичні навантаження. Спираючись на встановлені залежності для статичних навантажень, дослідники намагалися виявити зв'язок між механічними і балістичними характеристиками матеріалів та прогнозувати їх зміни.

Однак в роботах [11-14] дослідники наполягають на тому, що реакція матеріалу на високошвидкісні ударні навантаження при балістичному впливі має інший механізм, ніж при статичних навантаженнях, і оцінити балістичні характеристики, оперуючи виключно даними про поведінку матеріалу при статичних навантаженнях, неможливо, особливо коли мова йде про порівняльну характеристику двох схожих за властивостями матеріалів.

У зв'язку із цим на перший план виходять методи імітаційного моделювання, які в сучасних умовах розвиваються дуже динамічно. Таким чином виникає задача вибору найбільш адекватної аналітичної моделі для опису високошвидкісного процесу зіткнення вражаючого елемента з перешкодами, особливо якщо перешкода має багат шарову структуру. Для цих моделей характерна багатовимірність, нелінійність і неоднозначність характеристик, що обумовлює їх наближеність і неповноту.

В опублікованих дослідженнях [15-17] було вивчено опір проникненню вражаючого елемента в пластину гомогенного типу алюмінієвого сплаву, і в більшості з них використовуються скінчено-елементні моделі, які складені з плоских (оболочечного типу) скінчених елементів. У роботі [17] наведено порівняння між конкретними гомогенними алюмінієвим і сталевим сплавами, а у [18] – порівняння між різними сплавами алюмінію.

У статті [18] для проведення розрахунків розроблена модель вражаючого елемента для програмного продукту LS-DYNA. Крім того, досліджувався вплив розмірів скінченого елемента в скінчено-елементній моделі для забезпечення отримання результатів з прийнятною точністю і мінімальним часом розв'язання.

У статті [19] детально досліджено процес нормального пробиття подовженими вражаючими елементами тонких і “напівнескінчених” однорідних пластин при низьких швидкостях удару. Розрахунки проведені за допомогою чисельного лагранжевого методу, модифікованого для розв'язання багатоконтактних динамічних задач механіки деформованого твердого тіла.

Велика увага приділялася і моделюванню багат шарових пакетів для перешкод. У роботах [20-22] розглянуті багат шарові пакети, які складаються з плоских пластин титану, алюмінію та кераміки змінної

товщини. Дослідження велися з урахуванням високошвидкісного впливу сталевого півсферичного вражаючого елемента на набір матеріалів. При такому впливі враховувалися зміна міцності матеріалу, наявність великих пластичних деформацій, нагрівання. При дослідженні враховувалися конструктивні особливості пластини, форму, геометрію і величину швидкості вражаючого елемента.

У роботі [23] запропонована 3-D методика моделювання процесів високошвидкісної взаємодії компактних вражаючих елементів з шаруватими перешкодами, які у своєму складі мають керамічні прокладки, при зіткненні по нормалі і під кутом до поверхні останніх.

Однак представлений огляд існуючих методів оцінки балістичних характеристик розглядає багат шарові перешкоди як окремі шари [20-22], які не з'єднані один з одним. Крім того, у процесі проектування елементів бронезахисту при виборі необхідних матеріалів і їх товщини виникають труднощі, які пов'язані з відсутністю інформації про внесок у загальний рівень стійкості комбінованої перешкоди кожного окремо взятого шару та особливостей їх з'єднання.

Мета статті та завдання дослідження. Метою цього дослідження є удосконалення методу розрахунку бронестійкості багат шарових броньованих структур, які створені шляхом зварювання шарів композиту у твердій фазі (без розплавлення) за вакуумно-деформаційною методикою, при впливі високошвидкісного вражаючого елемента.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- удосконалити метод розрахунку бронестійкості багат шарових броньованих структур, які створені шляхом зварювання шарів композиту у твердій фазі (без розплавлення) за вакуумно-деформаційною методикою;
- сформулювати вихідні дані для імітаційного моделювання;
- провести імітаційне моделювання бронестійкості багат шарових броньованих структур при впливі удару високошвидкісного вражаючого елемента.

Основний матеріал. Використання методу скінченних елементів для моделювання процесу взаємодії вражаючого елемента і багат шарової перешкоди. У даній статті розглядаються задачі імітаційного моделювання процесів високошвидкісного удару вражаючого елемента по багат шарової металевій перешкоді, шари якої мають однорідну структуру та створені шляхом зварювання шарів композиту у твердій фазі. Для визначення деформованого стану таких пластин вирішувалася динамічна контактна задача з граничними і початковими умовами. При розрахунку враховувалися зміни міцності матеріалу, наявність великих пластичних деформацій, нагрівання. При дослідженні враховувалися конструктивні особливості пластини, форма, геометрія, величина, швидкість і матеріал вражаючого елемента. В основу покладено метод скінченних елементів. Для цього використовувалося комп'ютерне проектування та моделювання образів досліджуваних об'єктів на базі обчислювальних логічних алгоритмів CAE-модуля ANSYS.

Рух суцільного середовища описується з використанням закону збереження маси, закону збереження імпульсу, закону збереження енергії. Математична модель руху суцільного середовища чисельно вирішується в ANSYS шляхом використання явного інтегрування за часом. Малий час збільшення використовується для забезпечення стабільності і точності розв'язання.

Для лагранжевих формулювань в системі ANSYS щільність в будь-який момент може бути визначена з поточного об'єму зони і її початкової маси [20-22]

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Рівняння в частинних похідних, які виражають закон збереження імпульсу, пов'язують прискорення і тензор напружень σ_{ij} :

$$\begin{aligned} \rho \ddot{x} &= b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}; \\ \rho \ddot{y} &= b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}; \\ \rho \ddot{z} &= b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2)$$

Закон збереження енергії виражається наступним чином:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \left(\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx} \right). \quad (3)$$

Ці рівняння вирішуються в явному вигляді для кожного елемента в моделі, заснованої на вхідних значеннях в кінці попереднього кроку за часом. При інтегруванні застосовують метод центральних різниць. Прискорення оцінюються для t :

$$\{a_t\} = [M]^{-1} \left([F_t^{\text{ext}}] - [F_t^{\text{int}}] \right), \quad (4)$$

де $\{a_t\}$ – вектор прискорення; $[M]$ – матриця мас; $[F_t^{\text{ext}}]$ – вектор прикладених зовнішніх сил; $[F_t^{\text{int}}]$ – вектор внутрішніх сил.

Вектор внутрішніх сил розраховується за формулою

$$F^{\text{int}} = \sum \left(\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F^{\text{hg}} \right) + F^{\text{contact}}, \quad (5)$$

де F^{hg} – сила hourglass-опору; F^{contact} – сила контакту;

$$\sigma_n = \begin{cases} \sigma_i \\ \sigma_i + \sigma_{zl} \end{cases},$$

де σ_n – межа міцності матеріалу, i – номер шару; $\sigma_{zl} = \sigma_z + \sigma_{zs}$ – межа міцності для елементів на кордоні з'єднання шарів, яка враховує особливості технології зварювання у твердій фазі (без розплавлення) за

вакуумно-деформаційною методикою та складається з міцності між шарами σ_z та межі міцності зсуву σ_{zs} .

Потім обчислюються швидкості і переміщення:

$$\begin{aligned} \{v_{t+\Delta t/2}\} &= \{v_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\}\Delta t; \\ \{u_{t+\Delta t}\} &= \{u_t\} + \{v_{t+\Delta t/2}\} + \{a_t\}\Delta t_{t+\Delta t/2}; \\ \Delta t_{t+\Delta t/2} &= 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}); \\ \Delta t_{t-\Delta t/2} &= 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t}). \end{aligned} \quad (6)$$

Геометрія оновлюється додаванням збільшень переміщень до вихідної геометрії $\{x_0\}$:

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}. \quad (7)$$

Для спрощення обернення матриць потрібно діагональна матриця мас. Виходячи з того, що рівняння стають непов'язаними, то в програмному пакеті ANSYS вони вирішуються явно. Обернення матриці жорсткості не потрібно. Всі нелінійності (включаючи контакт) враховуються в векторі внутрішніх сил.

Для моделювання фізичних явищ, що відбуваються у вражаючому елементі та перешкоді, таких як деформаційне і швидкісне зміцнення, температурне зміцнення, руйнування і т.і., необхідно використовувати моделі поведінки матеріалів, які, в загальному випадку, складаються з трьох основних елементів: рівняння стану (equation of state), моделі пластичності (plasticity model) і моделі руйнування (damage model).

Рівняння стану описує залежність напружень від деформації і внутрішньої енергії (температури). Воно може бути задано виходячи з даних про термодинамічні властивості матеріалу. У більшості випадків рівняння стану для розрахунків формується на підставі експериментальних даних, що є лінійною апроксимацією реального рівняння стану на основі ретельно проведених експериментів і являє собою многочлен з деякою кількістю емпіричних констант.

У випадку малостисливих матеріалів, якими є сталі різних марок, рівняння стану задається співвідношенням:

$$p = K\mu, \quad (8)$$

де p – тиск; K – модуль об'ємної пружності; μ – ступінь стиску середовища.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1,$$

де E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ і ρ_0 – поточне й початкове значення щільності матеріалу.

Співвідношення (8) справедливо для пружної деформації при невеликих об'ємних деформаціях, після якої настає стадія пластичної деформації. На цей час для моделювання та дослідження пластичної деформації, що спостерігається при високошвидкісних процесах зіткнення вражаючого елемента з перешкодою найбільше поширення отримали

моделі Купера-Саймондса (Cowper-Symonds) [24], Джонсона-Кука (Johnson-Cook) [25] і Зеріллі-Армстронга (Zerilli-Armstrong) [26]. Ці моделі мають порівняно невелику кількість констант, що характеризують матеріал, і реалізовані в сучасних пакетах чисельного аналізу. У [27] проведено аналіз недоліків та переваг цих моделей та обґрунтовано вибір моделі Джонсона-Кука для імітаційного моделювання.

Модель Джонсона-Кука [25] дозволяє описувати динамічну межу плинності металів, що піддаються великим деформаціям, високим швидкостям деформації і високим температурам:

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \left(1 - T_c^{*m} \right), \quad (9)$$

де ε – пластична деформація; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ – безрозмірна швидкість пластичної деформації, що визначається як відношення миттєвої швидкості пластичної деформації $\dot{\varepsilon}$ до її граничного значення $\dot{\varepsilon}_0$ [с⁻¹]; T_c^* – гомологічна температура; A – статична межа плинності; B – модуль деформаційного зміцнення; n – показник ступеня в законі деформаційного зміцнення; C – коефіцієнт швидкості деформацій; m – показник ступеня в законі температурного зменшення.

Крім того, модель Джонсона-Кука передбачає незалежність відносного впливу деформаційного зміцнення, швидкості пластичної деформації і підвищення температури при всіх швидкостях і температурах пластичної деформації.

В якості критерію руйнування була обрана модель Джонсона-Кука на базі кумулятивного закону накопичення пошкодженості.

Формування вихідних даних для моделювання. Для імітаційного моделювання процесу взаємодії вражаючого елемента з перешкодою використовувалася загальна модель кулі з номінальною масою 10 г. та початковою швидкістю $V_2 = 820$ м/с.

Зовнішній вигляд вражаючого елемента [28] та її трьохмірна модель після моделювання за допомогою спеціалізованої програмної системи ANSYS наведені на рис. 1. Зовнішня оболонка вражаючого елемента (рис. 1(б)) є сталь, плакована томпаком. Матеріал осереддя – інструментальна вуглецева сталь з твердістю HRC не нижче 60 одиниць.

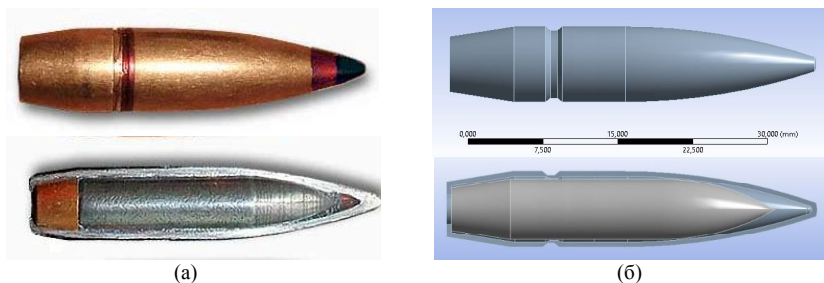


Рис. 1. Зовнішній вигляд вражаючого елемента: (а) фотографія (б) тривимірна модель

Для моделювання поверхонь вражаючого елемента використовувалися

тетраедральні ізопараметричні елементи. На рис. 2 наведена сітка розбиття на скінчені елементи поверхонь вражаючого елемента. Характеристики сітки наступні: оболонка вражаючого елемента (томпак) – 1064 вузла та 680 елементів; осереддя вражаючого елемента (сталь з твердістю HRC не нижче 60 одиниць) – 459 вузлів та 360 елементів; осереддя та заглушка (свинець) – 1058 вузлів та 847 елементів.

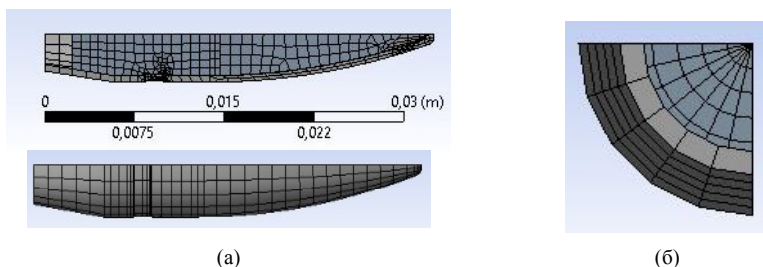


Рис. 2. Сітка скінчених елементів для вражаючого елемента:
(а) вид з ліва; (б) вид з заду

Наступним етапом є моделювання перешкоди. Перешкодою є пластина з шаруватого металевго композиту довільної товщини (у даному дослідженні 10 мм). У даній роботі розглядається двшарова структура, але розроблений підхід дозволяє досліджувати і більш складні структури. Фронтальний шар є металом з твердістю HRC не менше 60 одиниць. Тильний шар є також металевим (гомогенний матеріал), але більш пластичний та має твердість HRC до 40 одиниць.

З'єднання шарів композиту між собою здійснюють їх зварюванням у твердій фазі (без розплавлення) за вакуумно-деформаційною методикою, що вносить додаткові корективи в структуру композиту і впливає на властивості композита протистояти удару вражаючого елемента та моделювалося в ANSYS за допомогою додавання до існуючої моделі зв'язку між шарами, який характеризувався наступними величинами: σ_z межа міцності між шарами, що дорівнює 10^3 МПа та σ_{zs} межа міцності зсуву – $8,2 \cdot 10^4$ МПа.

Для моделювання поверхонь шарів перешкоди також використовувалися тетраедральні ізопараметричні елементи. На рис. 3 наведена сітка скінчених елементів для багатошарової перешкоди.

Сітка скінчених елементів пластини має згущення в області зіткнення. Характерний розмір елемента в площині пластини є 0,33 мм. Кількість шарів елементів сітки залежить як від заданої товщини перешкоди взагалі, так і від кількості та товщини кожного шару. Наприклад, двшарова структура буде мати двадцять шарів елементів по товщині. Розмір елементів збільшується в міру віддалення від зони зіткнення. Характеристики сітки перешкоди – 61504 вузла та 55815 елементів.

Вражаючий елемент стикається з багатошарової перешкодою перпендикулярно до осі перетину перешкоди зі швидкістю $V = 820$ м/с. Перешкодою є двшарова бронепластина наступної структури: перший

шар (фронтальний) – інструментальна вуглецева сталь з твердістю HRC не менше 60 одиниць товщиною 6 мм, другий (тильний) – сталь з твердістю HRC до 40 одиниць товщиною 4 мм. Схема їх взаємодії наведена на рис. 4.

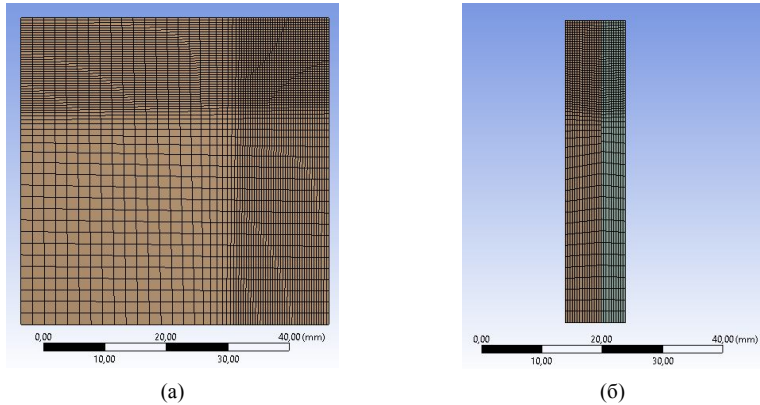


Рис. 3. Сітка скінченних елементів для багатошарової перешкоди:
(а) вид з переду; (б) вид з ліва

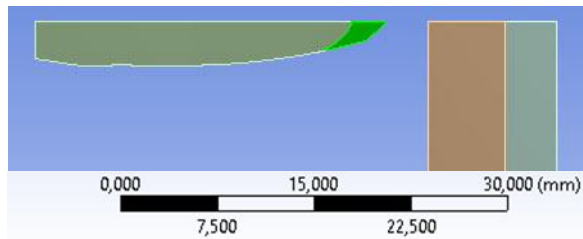


Рис. 4. Схема взаємодії вражаючого елемента з перешкодою

Враховуючи те, що взаємодія вражаючого елемента та перешкоди згідно зі схемою (рис. 4) в початковий момент часу відбувається під кутом 90^0 в двох площинах одночасно, модель побудована для однієї чверті перешкоди та вражаючого елемента. При цьому були задані відповідні обмеження, які вказують на симетричність розв'язуваної задачі в двох площинах. Вражаючий елемент при цьому було розташовано на початку моделювання впритул з перешкодою в точці очікуваної взаємодії. Час моделювання від початку зіткнення вражаючого елемента з перешкодою дорівнював 10^{-4} с.

Результати моделювання напружено-деформованого стану багатошарових броньованих структур при впливі удару вражаючого елемента. Результати скінчено-елементного моделювання з використанням моделі Джонсона-Кука показали наступне. При зіткненні вражаючого елемента з багатошаровою перешкодою починається процес деформування як самого вражаючого елемента, так і пластини.

Часова динаміка розвитку процесу взаємодії вражаючого елемента з перешкодою наведена на рис. 5. Тривалість T зазначена для кожного

кадру в мікросекундах – це інтервал часу від моменту стикання вражаючого елемента з перешкодою ($T = 0$ с) до комп'ютерної фіксації певного етапу пробиття.

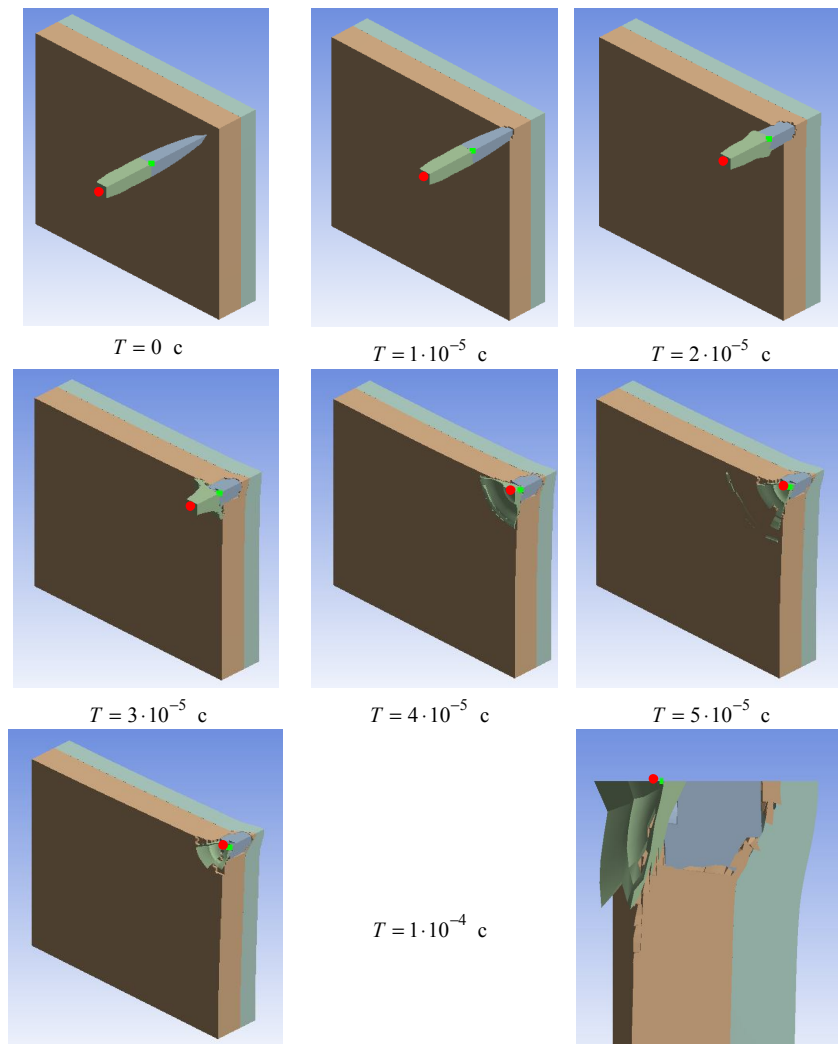


Рис. 5. Часова динаміка пробиття перешкоди вражаючим елементом

При зіткненні вражаючого елемента з перешкодою в момент торкання починається процес деформування першого шару пластини і наростання у всіх компонентах напруження та деформацій. Процес пробиття першого шару перешкоди триває до 30-ї мкс. Протягом цього часу відбувається деформація вражаючого елемента і падіння його швидкості (в точці центру мас) до 85%. Залежність швидкості центру мас (місце центру мас показано зеленим квадратом на рис. 5) вражаючого елемента приведена на рис. 6.

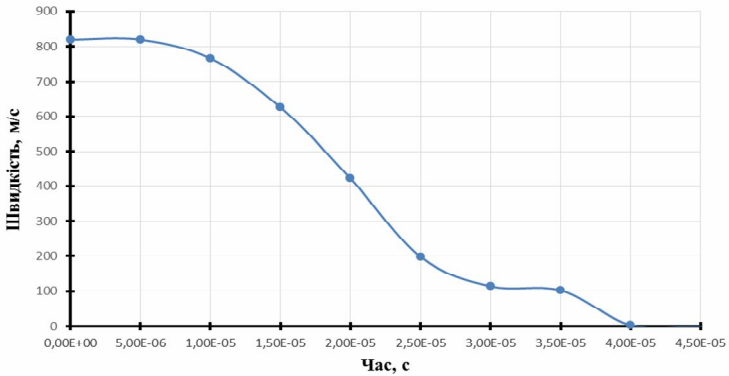


Рис. 6. Залежність швидкості центру мас вражаючого елемента від часу

На рис. 7 наведено залежність швидкості центра дна вражаючого елемента (місце центра дна вражаючого елемента показано на рис. 5 червоним колом) від часу. З даного графіка видно, що падіння швидкості даної точки вражаючого елемента до 30-ї мкс на відміну від швидкості точки мас відбувається незначне, до 740 м/с. Це пояснюється тим, що відбувається деформація вражаючого елемента, і точка дна, практично зберігаючи свою швидкість, зближується з центром мас вражаючого елемента. Далі відбувається взаємодія даної точки з перешкодою і швидкість починає різко знижуватися до нуля.

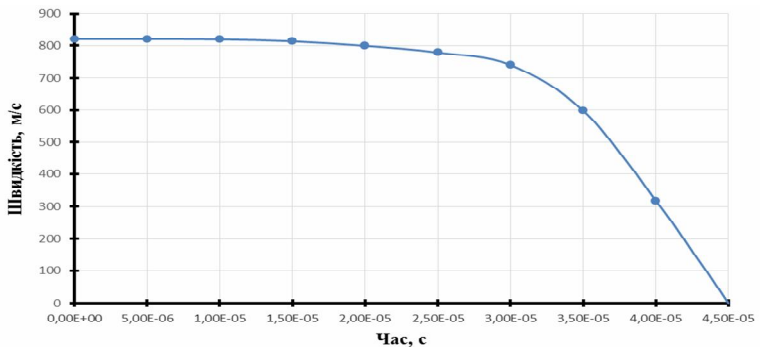


Рис. 7. Залежність швидкості центра дна вражаючого елемента від часу

Зона пробиття і виплеску матеріалу набуває форму кола. З 30-ї до 40-ї мкс відбувається проникнення в другий шар. Далі до 70 мкс спостерігається процес розриву зв'язків між шарами в області удару, прогинання пластини до 0,56 мм і формування вигину на тильній стороні величиною 1,98 мм, деформація вражаючого елемента і повна його зупинка.

Розглянемо цей процес з точки зору деформацій і напружень вражаючого елемента і перешкоди (рис. 8).

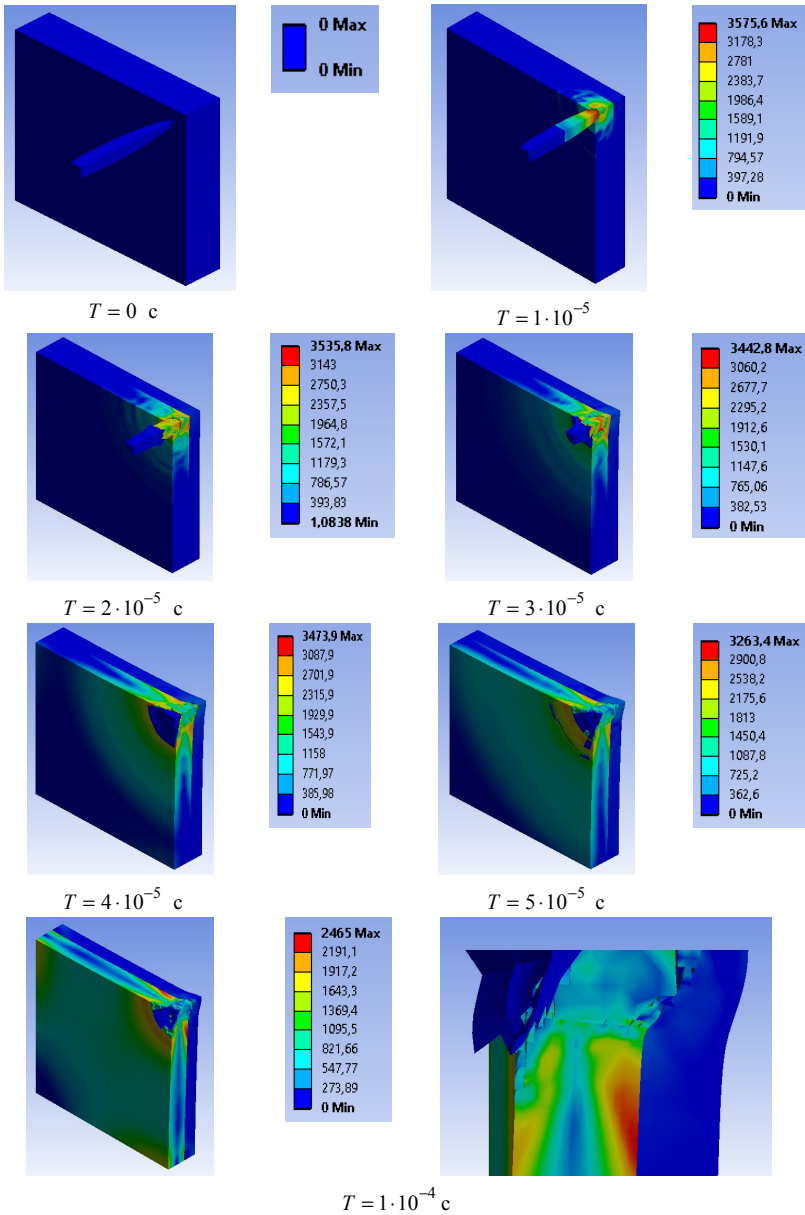


Рис. 8. Часова динаміка розподілу еквівалентного напруження по Мізесу при пробитті перешкоди вражаючим елементом

З плином часу взаємодії вражаючого елемента з перешкодою спостерігається наростання у всіх компонентах напруження та деформації. Значення ефективно пластичної деформації вражаючого елемента з перешкодою змінюється нерівномірно.

У початковий момент часу до 10 мкс зона максимальних значень пластичних деформацій зосереджена в точці зіткнення вражаючого елемента та перешкоди. Причому основний вплив припадає на вражаючий елемент, який зазнає значної деформації.

Поступово починається руйнування першого шару перешкоди починаючи з 5-ої мкс. До 30-ої мкс спостерігається наростання напруження в першому шарі з проникненням вражаючого елемента до межі вакуумно-деформаційного з'єднання. Зона ефективних пластичних деформацій, близьких до граничного значення, набуває форму кільця на межі зони виплеску матеріалу на лицьовій частині перешкоди. Починаючи з 40-ої мкс перший твердий шар перешкоди пробитий і вражаючий елемент починає взаємодію з другим в'язким шаром.

Протягом наступних 25-ти мкс відбувається деформування другого шару, проте величина пластичної деформації досягає лише 30% своєї максимальної величини. У першому шарі ефективні пластичні деформації поширюються по всій пластині, причому при видаленні від точки зіткнення величина напруження і деформації зменшується практично за лінійним законом.

При аналізі напруження всередині перешкоди, після зупинення вражаючого елемента, максимум напруження зосереджено на межі з'єднання двох шарів, що в деяких випадках призводить до механічного розриву з'єднання шарів.

Таким чином, вихідні дані математичного моделювання напружено-деформованого стану багатошарових броньованих структур при впливі удару вражаючого елемента дозволять отримати багато корисної інформації, яка дозволяє в подальшому проводити аналіз процесу зіткнення вражаючого елемента і багатошарової перешкоди та сформулювати обґрунтовані висновки та практичні рекомендації.

Висновки

1. У результаті дослідження удосконалено метод розрахунку бронестійкості багатошарових броньованих структур, які створені шляхом зварювання шарів композиту у твердій фазі (без розплавлення) за вакуумно-деформаційною методикою за допомогою методу скінченних елементів.

Для моделювання фізичних явищ, що відбуваються у вражаючому елементі та перешкоді, таких як деформаційне і швидкісне зміцнення, температурне знеміцнення, руйнування і т.і. використовувалися моделі трьох основних елементів: рівняння стану, модель пластичності (моделі Джонсона-Кука) і моделі руйнування (сполучена модель Джонсона-Кука на базі кумулятивного закону накопичення пошкодження).

З'єднання шарів композиту між собою моделювалося за допомогою додавання до існуючої моделі зв'язку між шарами, який характеризувався межею напруженості та межею напруги зсуву.

2. Вибрані та обґрунтовані вихідні дані для імітаційного моделювання. Для моделювання поверхонь вражаючого елемента та перешкоди використовувалися тетрадральні ізопараметричні елементи. Кількість елементів сітки розбиття на скінченні елементи вражаючого елемента та перешкоди обрані таким чином, що забезпечується збіжність результатів

розрахунку. Крім того, малий час збільшення при моделюванні забезпечує стабільність і точність розв'язання. При моделюванні контролюється виконання закону збереження маси, імпульсу та енергії системи “вражаючий елемент – перешкода”.

3. Отримані результати імітаційного моделювання бронестійкості двохшарової бронепластики наступної структури: перший шар (фронтальний) – інструментальна вуглецева сталь з твердістю HRC не нижче 60 одиниць товщиною 6 мм, другий (тильний) – сталь з твердістю HRC 40 одиниць товщиною 4 мм при впливі удару високошвидкісного вражаючого елемента. Розглянуто вплив особливостей технології з'єднання шарів на поведінку швидкості центру мас і дна вражаючого елемента та розподілу еквівалентного напруження по Мізесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ogorkiewicz, R. M.* Advances in armour materials. International Defence Review. – 1991. – № 4. – P. 349-352.
2. *Анастасиади, Г.П.* Работоспособность броневых материалов [Текст] / Г.П. Анастасиади, М.В. Сильников / НПО “Специальные материалы”. – СТО., 2004. – 622 с.
3. Основные направления развития средств индивидуальной бронезащиты : материалы международной научно-практич. конф. [“Спецсредства индивидуальной бронезащиты”], (Москва, 24 апреля 2013 г.) – М. : ВВЦ, 2013. – 133 с.
4. Microhardness and High-Velocity Impact Resistance of SiC and ZrB₂/SiC Composites / J. Marschall, D C. Erlich, H. Manning, W. Duppler, D. Ellerby, M. Gasch // J. Mater. Sci. – 2004. – № 39. – P. 5959-5968.
5. *Игнатова, А.М.* Аналитический обзор современных и перспективных материалов и конструкций бронепреград и защит от поражения [Текст] / А.М. Игнатова., А.О. Артемов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-1. – С. 101-105.
6. *Игнатов, М.Н.* Исследование взаимосвязи акустической эмиссии и разрушения камнелитых материалов в условиях одноосного сжатия [Текст] / М.Н. Игнатов, А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.А. Асанов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 126-132.
7. *Игнатова, А.М.* Методика исследования диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов при высокоскоростном пробивании [Текст] / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, М.Н. Игнатов, М.А. Сокоиков // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9-1. – С. 145-150.
8. *Игнатова, А.М.* Исследование диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов для создания на их основе броневой защиты [Текст] / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.В. Чудинов, М.Н. Игнатов, М.А. Сокоиков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 105-112.
9. Новые тенденции в области средств индивидуальной защиты пехотинца [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.defens-update.com/features/du-2-07/infantry_armor_cooling.htm. – Загол. з екрану.
10. *Чернышов, Е.А.* Создание металлокерамических элементов баллистической защиты с применением керамики на основе алюминия [Текст] / Е.А. Чернышов, В.В. Мильников, М.В. Мильникова, А.Д. Романов, Е.А. Романова // Современные наукоёмкие технологии. – 2014. – №4. – С. 97-101.
11. *Смирнов, В.П.* Оценка эффективности защиты армейских средств индивидуальной бронезащиты [Текст] / В.П. Смирнов // Техника и вооружение. – № 7. – 2013.
12. *Игнатова, А.М.* Противокумулятивная защита техники с применением синтетических минеральных сплавов [Текст] / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, М.Н. Игнатов // Двойные технологии. – 2014. – № 2 (67). – С. 13-17.
13. Легкие баллистические материалы. Под ред. А. Бхатнагара. – М.: Изд. “ЗАО “РИЦ Техносфера”, 2011. – 392 с.
14. *Авершьева, А.С.* Обобщенный алгоритм расчета конструкций на высокоскоростной удар [Текст] / А.С. Авершьева, А.А. Локтев // Вестник Московского Национального исследовательского государственного строительного университета. – 2012. – № 7. – С. 51-

- 59.
15. *Borvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M.* Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates // Intern. J. of Impact Engineering. 2011. Vol. 38. Iss. 7. Pp. 577-589. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001.
 16. *Jorgensen K.C., Swan V.* Modeling of armour-piercing projectile perforation of thick aluminium plates // 13th Intern. LS-DYNA Users Conf. 2014 (Dearborn, Michigan, USA, June 8-10 2014): Conf. papers. Livermore: LSTC, 2014. – 15 p.
 17. *Liu Z.S., Swaddiwudhipong S., Islam M.J.* Perforation of steel and aluminum targets using a modified Johnson–Cook material model // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol. 250. Pp. 108-115. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.026.
 18. *Шаш В.Н.* Численное моделирование проникания пуль стрелкового оружия в пластины из алюминиевых сплавов с использованием модифицированной модели Джонсона–Кука / Шаш Н.И., Зувов В.Н. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 01. С. 1–19. DOI: 10.7463/0117.0000922.
 19. *Глазырин, В.П.* Расчет процесса пробития ударниками с различной формой головных частей однородных преград [Текст] / В.П. Глазырин, М.Ю. Орлов, Ю.Н. Орлов, Г.Н. Богомолов // Вестник бурятского государственного университета, 2011 – №9 – С.245-248.
 20. *Добротворский, С.С.* Исследование степени деформации многослойных пакетов при ударном нагружении полусферическим ударником с применением САЕ систем [Текст] / С.С. Добротворский, С.С. Гнучих Л.Г. Добровольская // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии № 69, Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков, 2015 – С. 200-205.
 21. *Добротворский, С.С.* Исследование степени деформации двухслойных титановоалюминиевых пакетов при ударном нагружении стальным инструментом с применением САЕ систем [Текст] / С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ “ХПІ”, 2015. – №4 (1113) – С. 166-169.
 22. *Добротворский, С.С.* Моделирование процесса ударного деформирования пластин полусферическим ударником [Текст] / С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ “ХПІ”. 2015. – №40(1149) Технології в машинобудуванні – С. 39-42.
 23. *Герасимов, А.В.* Численное моделирование пробития слоистых преград [Текст] / А.В. Герасимов, С.В. Пашков // Механика композиционных материалов и конструкций – том 19, №1, 2013 – С. 49-62.
 24. *Cowper, G.R.* Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams / G. R. Cowper, P. S. Symonds // Brown Univ., Div. of Appl. Mech. – 1952. - Report № 28. – 46 p.
 25. *Johnson, G.R.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Proceedings of the 7-th International Symposium on Ballistics. – The Hague, The Netherlands. – 1983. – P. 541-547.
 26. *Zerilli, E.J.* Dislocation mechanics based constitutive relations for material dynamics calculations / E. J. Zerilli, R. W. Armstrong // J. Appl. Phys. – 1987. – № 61(5). – P. 1816-1825.
 27. *Баулін Д.С.* Математична модель високошвидкісної взаємодії вражаючого елемента та багаточислової перешкоди / Д.С. Баулін, С.А. Горелишев, С.А. Манжура // матеріали VIII науково-практ. конференції, секція 2, Харків, 29 березня 2018р.: тези доповідей. – Х.: Національна академія Національної гвардії України, 2017. – С.117-119.
 28. *Патроны к стрелковому оружию. (Справочное пособие) / [Коломыйцев А.В., Собакарь И.С., Никитюк В.Г., Сомов В.В.]* – Х.: НИИ судебных экспертиз им. Н.С. Бокариуса, 2003. – 336 с.

REFERENCES

1. *Ogorkiewicz, R. M.* Advances in armour materials. International Defence Review. – 1991. – № 4. – P. 349-352.
2. *Anastasiadi, G.P.* Rabotosposobnost' bronevykh materialov (Efficiency of armor materials) / G.P. Anastasiadi, M.V. Sil'nikov / NPO “Spetsial'nyye materialy”. – СТО., 2004. – 622 s.
3. *Osnovnyye napravleniya razvitiya sredstv individual'noy bronzeshchity (The main directions of development of personal protective equipment) : materialy mezhdunarodnoy nauchno-praktich. konf. [“Spets sredstva individual'noy bronzeshchity”], (Moskva, 24 aprelya 2013 g.,)* – М. : VVTS, 2013. – 133 s.
4. *Microhardness and High-Velocity Impact Resistance of SiC and ZrB₂/SiC Composites / J. Marshall, D C. Erlich, H. Manning, W. Duppler, D. Ellerby, M. Gasch // J. Muter. Sci. – 2004. – №. 39. – R. 5959-5968.*
5. *Ignatova, A.M.* Analiticheskiy obzor sovremennykh i perspektivnykh materialov i konstruksiy

- bronepregrad i zashchit ot porazheniya (Analytical review of modern and promising materials and designs of armored obstacles and defenses against destruction) / A.M. Ignatova, A.O. Artemov // Fundamental'nyye issledovaniya. – 2012. – № 6-1. – S. 101-105.
6. *Ignatov, M.N.* Issledovaniye vzaimosvyazi akusticheskoy emissii i razrusheniya kamnelitykh materialov v usloviyakh odnoosnogo szhatiya (Investigation of the relationship of acoustic emission and destruction of kamnelite materials under uniaxial compression) / M.N. Ignatov, A.M. Ignatova, A.O. Artemov, V.A. Asanov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. – 2011. – № 2. – S. 126-132.
 7. *Ignatova, A.M.* Metodika issledovaniya dissipativnykh svoystv sinteticheskikh mineral'nykh splavov pri vysokoskorostnom probivani (Research methods for dissipative properties of synthetic mineral alloys during high-speed punching) / A.M. Ignatova, A.O. Artemov, M.N. Ignatov, M.A. Sokovikov // Fundamental'nyye issledovaniya. – 2012. – № 9-1. – S. 145-150.
 8. *Ignatova, A.M.* Issledovaniye dissipativnykh svoystv sinteticheskikh mineral'nykh splavov dlya sozdaniya na ikh osnove bronevoy zashchity (Investigation of dissipative properties of synthetic mineral alloys to create armor protection on their basis) / A.M. Ignatova, A.O. Artemov, V.V. Chudinov, M.N. Ignatov, M.A. Sokovikov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. – 2012. – № 3. – S. 105-112.
 9. Novyye tendentsii v oblasti sredstv individual'noy zashchity pekhotintsa (New trends in infantry personal protective equipment) [Yelektronniy resurs] – Rezhim dostupu: http://www.defens-update.com/features/du-2-07/infantry_armor_cooling.htm. – Zagol. z yekranu.
 10. *Chernyshov, Ye.A.* Sozdaniye metallokeramicheskikh elementov ballisticheskoy zashchity s primeneniye keramiki na osnove alyuminiya (Creation of metal-ceramic elements of ballistic protection using aluminum-based ceramics) / Ye.A. Chernyshov, V.V. Myl'nikov, M.V. Myl'nikova, A.D. Romanov, Ye.A. Romanova // Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. – 2014. – №4. – S. 97-101.
 11. *Smirnov, V.P.* Otsenka effektivnosti zashchity armeyskikh sredstv individual'noy bronzashchity (Evaluation of the effectiveness of the protection of the army means of individual armor) / V.P. Smirnov // Tekhnika i vooruzheniye. – № 7. – 2013.
 12. *Ignatova, A.M.* Protivokumulativnaya zashchita tekhniki s primeneniye sinteticheskikh mineral'nykh splavov (Anti-cumulative protection of equipment using synthetic mineral alloys) / A.M. Ignatova, A.O. Artemov, M.N. Ignatov // Dvoynyye tekhnologii. – 2014. – № 2 (67). – S. 13-17.
 13. Legkiye ballisticheskkiye materialy (Lightweight ballistic materials). Pod red. A. Bkhatnagara. – M.: Izd. “ZAO “RITS Tekhnosfera”, 2011. – 392 s.
 14. *Aversh'yev, A.S.* Obobshchenny algoritm rascheta konstruktsey na vysokoskorostnoy udar (Generalized algorithm for calculating structures for high-speed impact) / A.S. Aversh'yev, A.A. Loktev // Vestnik Moskovskogo Natsional'nogo issledovatel'skogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta. – 2012. – № 7. – S. 51-59.
 15. *Borvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M.* Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates // Intern. J. of Impact Engineering. 2011. Vol. 38. Iss. 7. Pp. 577-589. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001.
 16. *Jorgensen K.C., Swan V.* Modeling of armour-piercing projectile perforation of thick aluminium plates // 13th Intern. LS-DYNA Users Conf. 2014 (Dearborn, Michigan, USA, June 8-10 2014): Conf. papers. Livermore: LSTC, 2014. – 15 p.
 17. *Liu Z.S., Swaddiwudhipong S., Islam M.J.* Perforation of steel and aluminum targets using a modified Johnson-Cook material model // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol. 250. Pp. 108-115. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.026.
 18. *Shash V.N.* Chislennoye modelirovaniye pronikaniya pul' strelkovogo oruzhiya v plastiny iz alyuminiyevykh splavov s ispol'zovaniye modifitsirovannoy modeli Dzhonsona-Kuka (Numerical simulation of the penetration of small arms bullets into plates of aluminum alloys using a modified Johnson-Cook model) / Shash N.Í., Zuzov V.N. // Nauka i Obrazovaniye. MGТУ im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn. 2017. № 01. S. 1-19. DOI: 10.7463/0117.0000922.
 19. *Glazyrin, V.P.* Raschet protsessy probitiya udarnikami s razlichnoy formoy golovnykh chastey odnorodnykh pregrad (The calculation of the process of penetration by the impactors with different shapes of the head parts of homogeneous obstacles) / V.P. Glazyrin, M.YU. Orlov, YU.N. Orlov, G.N. Bogomolov // Vestnik buryatskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011 – №9 – S.245-248.
 20. *Dobrovorskiy, S.S.* Issledovaniye stepeni deformatsii mnogoslownykh paketov pri udarnom nagruzhении polusfericheskim udarnikom s primeneniye CAE sistem (Investigation of the degree of deformation of multilayer packages under shock loading by a hemispherical drummer using CAE systems) / S.S. Dobrovorskiy, S.S. Gnuchikh L.G. Dobrovolskaya // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii № 69, Natsional'nyy

- tehnicheskiiy universitet "KHPI", Khar'kov, 2015 – С. 200-205.
21. *Dobrovorskiy, S.S.* Issledovaniye stepeni deformatsii dvukhsloynnykh titanovoaluminiumyevykh paketov pri udarnom nagruzhennii stal'nym instrumentom s primeneniym CAE sistem (Investigation of the degree of deformation of two-layer titanium-aluminum packages under shock loading with steel tools using CAE systems) / S.S. Dobrovorskiy, S.S.Gnuchikh, L.G. Dobrovol'skaya // *Visnik NTU "KHPI"*. 2015. – №4 (1113) – С. 166-169.
 22. *Dobrovorskiy, S.S.* Modelirovaniye protsessa udarnogo deformirovaniya plastin polusfericheskim udarnikom (Modeling the process of striking a plate by a hemispherical drummer) / S.S. Dobrovorskiy, S.S.Gnuchikh, L.G. Dobrovol'skaya // *Visnik NTU "KHPI"*. 2015. – №40(1149) *Tekhnologii v mashinobuduvanni* – С. 39-42.
 23. *Gerasimov, A.V.* Chislennoye modelirovaniye probitiya sloistykh pregrad (Numerical simulation of breaking through layered obstacles) / A.V. Gerasimov, S.V. Pashkov // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy* – tom 19, №1, 2013 – С. 49-62.
 24. *Cowper, G.R.* Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams / G. R. Cowper, P. S. Symonds // *Brown Univ., Div. of Appl. Mech.* – 1952. - Report № 28. – 46 p.
 25. *Johnson, G.R.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // *Proceedings of the 7-th International Symposium on Ballistics.* – The Hague, The Netherlands. – 1983. – P. 541-547.
 26. *Zerilli, E.J.* Dislocation mechanics based constitutive relations for material dynamics calculations / E. J. Zerilli, R. W. Armstrong // *J. Appl. Phys.* – 1987. – № 61(5). – P. 1816-1825.
 27. *Baulin D.S.* Matematychna model vysokoshyvdkisnoyi vzyemodiyi vrazhayuchoho elementa ta bahatosharovoyi pereshkody (Mathematical model of high-speed interaction of striking element and multilayer obstacle) / D.S. Baulin, S.A. Horyelyshev, S.A. Manzhora // *materialy VIII naukovo-prakt. konferentsiyi, sektsiya 2, Kharkiv, 29 bereznya 2018r.: tezy dopovidey.* – KH.: Natsionalna akademiya Natsionalnoyi hvardiyi Ukrainy, 2017. – S.117-119.
 28. *Patrony k strelkovomu oruzhiyu.* (Small arms ammunition) (Spravochnoye posobiye) / [Kolomiytsev A.V., Sobakar' I.S, Nikityuk V.G., Somov V.V.] – KH.: NII sudebnykh ekspertiz im. N.S. Bokariusa, 2003. – 336 s.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2019 р.

Baulin D., Manzhora S., Odechuk M., Odeychuk A., Horielyshev S., Ilchenko M.

CALCULATION OF ARMOR-RESISTANT METAL MULTILAYER ARMORED STRUCTURES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

At present, when the power of modern kinetic weapons is constantly increasing, traditional metallurgical and materials science approaches to the production of homogeneous rolled steel of armored steels are no longer able to provide high dynamic stability. Fulfillment of this requirement leads to a significant increase in the thickness of the armor and, accordingly, the mass of the armored structure as a whole. One of the ways to solve this problem is the use of multilayer metal composites. The combination of high hard (but brittle) and soft (but viscous) steel layers into composites provides composites with a combination of hardness and viscosity that cannot be achieved using traditional methods of manufacturing armored steels (an emergent property).

In this paper, the process of interaction of high-speed impactor with protective multilayered armored obstacles, which was created by welding solid layer composites in a solid phase (without melting) by vacuum-deformation technique is considered.

The mechanism of the use of the finite element method for calculating the protective strength of the protective obstacles is investigated. Selected and substantiated source data for simulation modeling. For the modeling of physical phenomena that occur in the impactor and obstacle, such as strain and speed hardening, temperature weakening, destruction, etc. models of behavior of materials were used, which in the general case consist of three main elements: the state of equation, plasticity model and the damage model.

The results of calculating the armored-strength resistance of a two-layer armor plate of the following structure: the first layer (frontal) - instrumental carbon steel HRC ≥ 60 thickness 6 mm, second (back) - steel HRC=40 thickness 4 mm with the impact of impact high-impact impressive element. Influence of the features of the technology of compound of layers on the behavior of the center of mass velocity and the bottom of bullet velocity of and the distribution of the equivalent stress across the Mises is considered. Further researches are related to obtaining the dependence of armor-resistant multilayer armor plates on their overall thickness and structure (composition and ratio of layers), which will allow formulating recommendations for the choice of protective structures.

Keywords: model; armor-resistant; high-speed impactor; protective multilayered obstacles; solid-phase welding; deformation.

Баулін Д.С., Манжура С.А., Одейчук Н.П., Одейчук А.Н., Горельшиев С.А., Ильченко Н.И.

РАСЧЕТ БРОНЕСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ БРОНИРОВАННЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время, когда мощность современных средств кинетического поражения постоянно возрастает, традиционные металлургические и материаловедческие подходы к производству гомогенного (однородного) листового проката бронированных сталей уже не в состоянии обеспечить высокую динамическую стойкость без значительного увеличения толщины брони и, соответственно, массы бронезащитной структуры в целом. Одним из направлений решения этой проблемы является использование многослойных металлических композитов. Объединение в композиты слоев высокотвердой (но хрупкой) и мягкой (но вязкой) сталей обеспечивает композитам такое объединение твердости и вязкости, которое невозможно добиться с помощью традиционных методов изготовления бронированных сталей (свойство эмерджентности).

В данной работе рассматривается процесс взаимодействия высокоскоростного поражающего элемента с защитными многослойными бронированными преградами, которые созданы путем сварки слоев композита в твердой фазе (без расплавления) по вакуумно-деформационной методике.

Исследуется механизм использования метода конечных элементов для расчета бронестойкости защитных преград. Выбраны и обоснованы исходные данные для имитационного моделирования. Для моделирования физических явлений, которые происходят в поражающем элементе и преграде, таких как деформационное и скоростное упрочнения, температурное ослабление, разрушение и т.д. использовались модели поведения материалов, которые в общем случае, состоят из трех основных элементов: уравнения состояния (equation of state), модели пластичности (plasticity model) и модели разрушения (damage model).

Получены результаты расчета бронестойкости двухслойной бронепластины следующей структуры: первый слой (фронтальный) – инструментальная углеродистая сталь с твердостью HRC не ниже 60 единиц толщиной 6 мм, второй (тыльный) – сталь с твердостью HRC 40 единиц толщиной 4 мм, при воздействии удара высокоскоростного поражающего элемента. Рассмотрено влияние особенностей технологии соединения слоев на поведение скорости центра масс и дна пули и распределение эквивалентного напряжения по Мизесу. Дальнейшие исследования связаны с получением зависимости бронестойкости многослойных бронепластин от их общей толщины и структуры (состава и соотношения слоев), что позволит сформулировать рекомендации для выбора защитных структур.

Ключевые слова: модель, бронестойкость, высокоскоростной поражающий элемент, защитная многослойная преграда, сварка в твердой фазе, деформация.

УДК 531.66

Баулін Д.С., Манжура С.А., Одейчук М.П., Одейчук А.М., Горельшиев С.А., Ильченко М.І.

Розрахунок бронестійкості металевих багатослоєвих броньованих структур за допомогою методу скінчених елементів / Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 103. – С. 145-164.

Іл. 8. Бібліогр. 28 назв.

UDC 531.66

Baulin D., Manzhura S., Odeychuk M., Odeychuk A., Horielyshev S., Ilchenko M. **Calculation of armor-resistant metal multilayer armored structures using the finite element method / Strength of Materials and the Theory of Structures. – 2019. – Issue 103. – P. 145-164.**

Fig. 8. Ref. 28 items.

УДК 531.66

Баулін Д.С., Манжура С.А., Одейчук Н.П., Одейчук А.Н., Горельшиев С.А., Ильченко Н.И.

Расчет бронестойкости металлических многослойных бронированных структур с помощью метода конечных элементов / Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2019. – Вып. 103. – С. 145-164.

Ил. 8. Библиогр. 28 назв.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник науково-дослідного центру Національної академії Національної гвардії України, Національна академія Національної гвардії України. БАУЛІН Дмитро Станіславович

Адреса: 61001, Україна, м. Харків, майдан Захисників України 3, НАНГУ

Мобільний тел.: +38(095) 905-07-17

Імейл: baulinds1966@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7082-6954>

*PhD of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Research of laboratory for the provision of Service and Military Activities of the National Guard of Ukraine Scientific and Research Center of Service and Military Activities of the National Guard of Ukraine
National Academy of National Guard of Ukraine*

BAULIN Дмитро

Zakhysnykiv Ukrainy sq., 3, Kharkiv, Ukraine, 61001

Contact tel.: +38(095) 905-07-17

E-mail: baulinds1966@ukr.net

ORCID ID: [https:// orcid.org/0000-0002-7082-6954](https://orcid.org/0000-0002-7082-6954)

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): ад'юнкт докторантури та ад'юнктури Національної академії Національної гвардії України, Національна академія Національної гвардії України. МАНЖУРА Святослав Анатолійович

Адреса: 61001 Україна, м. Харків, майдан Захисників України, 3, НАНГУ

Мобільний тел.: +38(067) 701-57-07

Імейл: manzura@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4726-0320>

Post-graduate student of Scientific and Research Center of Service and Military Activities of the National Guard of Ukraine

National Academy of National Guard of Ukraine

MANZHURA Sviatoslav

Zakhysnykiv Ukrainy sq., 3, Kharkiv, Ukraine, 61001

Contact tel.: +38(067) 701-57-07

E-mail: manzura@ukr.net

ORCID ID: [https:// orcid.org/0000-0003-4726-0320](https://orcid.org/0000-0003-4726-0320)

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут". Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут". ОДЕЙЧУК Микола Петрович.

Адреса: Україна, м. Харків, вул. Академічна, 1, ННЦ "ХФТИ".

Мобільний тел.: +38(067) 578-43-22;

Імейл: npodeychuk@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6507-2588>

PhD of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Research of National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology",

National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology"

ODECHUK Mikolai

Akademicheskaya St., 1, Kharkiv, 61008

Contact tel.: +38(067) 578-43-22;

E-mail: npodeychuk@ukr.net

ORCID ID: [https:// orcid.org/0000-0002-6507-2588](https://orcid.org/0000-0002-6507-2588)

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут". Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут". ОДЕЙЧУК Андрій Миколайович.

Адреса: Україна, м. Харків, вул. Академічна, 1, ННЦ "ХФТИ".

Мобільний тел.: +38(067) 579-10-76

Імейл: anodeychuk @ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3061-2994>

PhD of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Research of National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology",

National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology"

ODEYCHUK Andrii

Akademicheskaya St., 1, Kharkiv, 61008

Contact tel.: +38(067) 579-10-76;

E-mail: anodeychuk @ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3061-2994>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник науково-дослідного центру Національної академії Національної гвардії України, Національна академія Національної гвардії України. ГОРСЛИШЕВ Станіслав Анатолійович.

Адреса: 61001 Україна, м. Харків, майдан Захисників України 3, НАНГУ.

Мобільний тел.: +38(067) 959-91-53

Імейл: port_6633@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1689-0901>

PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research laboratory for the provision of Service and Military Activities of the National Guard of Ukraine Scientific and Research Center of Service and Military Activities of the National Guard of Ukraine

National Academy of National Guard of Ukraine

HORIELYSHEV Stanislav

Zakhysnykiv Ukrainy sq., 3, Kharkiv, Ukraine, 61001

Contact tel.: +38(067) 959-91-53

E-mail: port_6633@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): начальник сектора Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут", Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут". ІЛЬЧЕНКО Микола Іванович.

Адреса робоча: Україна, м. Харків, вул. Академічна, 1, ННЦ "ХФТИ".

Мобільний тел.: +38(097) 894-75-07;

Імейл: ilchenkomi@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3450-4904>

Chief Department of National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology",

National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology"

ILCHENKO Nikolai

Akademicheskaya St., 1, Kharkiv, 61008

Contact tel.: +38(097) 894-75-07;

E-mail: ilchenkomi@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3450-4904>