

УДК 539.3

О.С. Петрученко, О.В. Флюд, Л.Д. Величко

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ДИНАМІЧНІ ТА КІНЕМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕТАПУ ПРОНИКНЕННЯ КУЛІ В БРОНЮ

В цій статті здійснений аналіз динамічних і кінематичних характеристик при співударі взаємодіючих твердих тіл на першому етапі проникнення з врахуванням основних характеристик, а саме: форми, швидкості в момент взаємодії, поширення пружних, пластичних і ударних хвиль, швидкості деформації і т. інше. Встановлено залежності жорсткості від часу взаємодії твердих тіл.

Ключові слова: вражаючий елемент, металева броня, взаємодія тіл, співудар, проникнення.

Актуальність. Вступ

Взаємодія вражаючого елемента з перешкодою, при відносно незначних швидкостях, супроводжується пружними та пластичними деформаціями матеріалів [1,4,5]. Цей напрям науково-технічного дослідження виходить за рамки вивчення динаміки твердого тіла, яке деформується.

Результатом удару взаємодіючих тіл є їх деформація і руйнація. При детальному описі динаміки співудару вражаючого елемента і металевої броні необхідно враховувати: форму, фізико-механічні характеристики, швидкість вражаючого елемента в момент взаємодії його з поверхню броні, поширення пружних, пластичних і ударних хвиль, швидкість деформації контактуючих тіл та багато інших факторів. Аналітичне дослідження співудару тіл з врахуванням перелічених факторів практично неможливе [1,3,5,6]. Тому дослідження співудару вражаючого елемента з металевою бронею проводять з певними припущеннями, та експериментально [1,2]. Необхідність цих досліджень обумовлена конструюванням індивідуального захисту для особового складу та підвищенням захищеності бойових машин від вражаючих елементів методами [7,8].

Постановка задачі

Взаємодію кулі з захисною бронею можна розбити на три пов'язаних між собою етапи:

- 1-й – проникнення кулі в поверхню броні;
- 2-й – пробивання броні;
- 3-й – виліт кулі із захисної броні (при умові наскрізного пробиття).

У роботі розглядається перший етап – процес проникнення кулі (форма якої має вигляд прямокутного паралелепіпеда з основою розмірами

$(b \times b$ та висотою L) в плоску поверхню металевої броні.

Аналізуючи реальний процес взаємодії кулі із металевою перешкодою, вважається, що впродовж цього періоду точка E (рис.1) залишається нерухомою до моменту проникнення кулі в поверхню металевої броні, деформується тільки куля (область деформації вказана трикутником ΔEKG на рис. 1 і рис. 2).

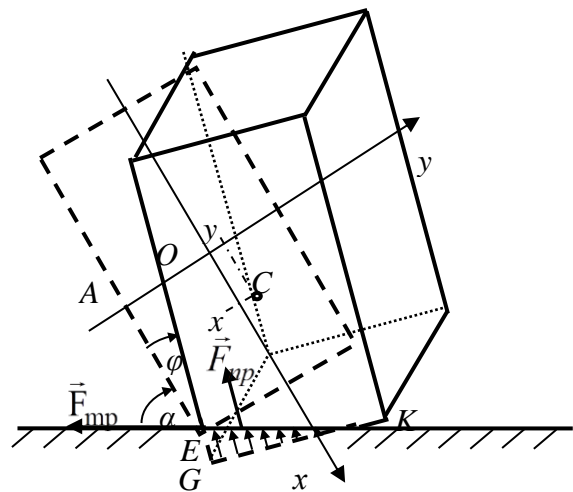


Рис. 1. Схематичне зображення взаємодії кулі з металевою бронею на етапі проникнення

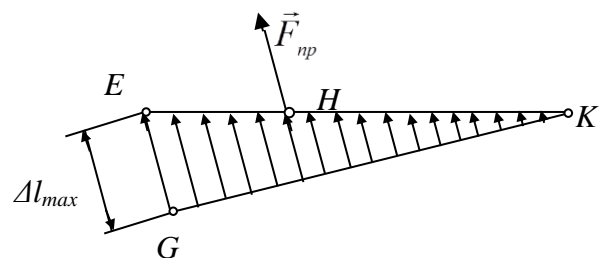


Рис. 2. Схема розподілу інтенсивності пружних сил і рівнодійної

Інтенсивність сил пружності від деформації кулі описується залежністю $q = c \cdot \Delta l$, де c – жорсткість деформівного елемента, а Δl – величина його деформації. Сумарна сила пружності від деформування кулі дорівнюватиме

$$F_{np} = 0,5c \cdot \Delta l_{\max} \cdot GK. \quad (1)$$

Оскільки $GK = \Delta l_{\max} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)$, то залежність (1) набуде вигляду

$$F_{np} = 0,5c \cdot (\Delta l_{\max})^2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi), \quad (2)$$

де φ – кут повороту кулі за проміжок часу $[0; t]$.

Точка прикладання H сили \vec{F}_{np} поділяє відрізок EK у співвідношенні 1:2, а саме – $EH = 0,5HK$.

Враховуючи геометрію рис. 1, запишемо, що

$$x = 0,5L - 0,5L \cos \varphi + 0,5b \sin \varphi + \Delta l_{\max} \cos \varphi, \quad (3)$$

$$y = 0,5b \cos \varphi - 0,5b + 0,5L \sin \varphi - \Delta l_{\max} \sin \varphi,$$

де x і y – координати центру мас кулі.

Оскільки кут φ – мала величина, то, провівши лінеаризацію рівнянь (3), отримано наступне:

$$x = 0,5b\varphi + \Delta l_{\max}, \quad y = 0,5L\varphi - \Delta l_{\max}\varphi. \quad (4)$$

В процесі співудару тіл на кулю діють сили: \vec{P} – вага кулі (якою можна нехтувати, оскільки її величина є малою); \vec{F}_{np} – сила пружності, обумовлена деформацією кулі; \vec{F}_{mp} – сила тертя, яка виникає в зоні контакту кулі з поверхнею металевої броні.

Вважається, що куля здійснює плоский рух та, враховуючи накладені обмеження, можна стверджувати, що вона має два ступеня вільності. Система диференціальних рівнянь, яка описує динаміку взаємодії кулі з поверхнею металевої броні, матиме вигляд

$$m\ddot{x} = -F_{np} \cos \varphi - F_{mp} \cos \alpha; \quad (5)$$

$$I_C \ddot{\varphi} = F_{np} \left(0,5b - \frac{\Delta l_{\max} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{3} \right) + F_{mp} \times$$

$$\times \left(0,5\sqrt{b^2 + L^2} \sin(\alpha + \gamma + \varphi) - \Delta l_{\max} \sin(\alpha + \varphi) \right),$$

де m – маса кулі, α – кут між напрямком швидкості кулі, до співудару тіл, з дотичною до поверхні металевої броні; $\gamma = \angle AEO$, O – положення центру мас кулі в початковий момент її дотику до поверхні броні і центр вибраної системи координат Oxy ; C – центр мас кулі, I_C – момент інерції кулі відносно осі перпендикулярної до площини рисунка (рис. 1) та яка проходить через її центр мас.

Враховуючи (2) і (4), система диференціальних рівнянь (5) набуде вигляду

$$m\ddot{x} = -0,5c(x - 0,5b\varphi)^2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \cos \varphi - F_{mp} \cos \alpha;$$

$$I_C \ddot{\varphi} = 0,5c(x - 0,5b\varphi)^2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \times$$

$$\times \left(0,5b - \frac{(x - 0,5b\varphi) \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{3} \right) + F_{mp} \times \quad (6)$$

$$\times \left(0,5\sqrt{b^2 + L^2} \sin(\alpha + \gamma + \varphi) - (x - 0,5b\varphi) \sin(\alpha + \varphi) \right).$$

При розв'язуванні цієї системи рівнянь брались наступні початкові умови: $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = V_0$, $y(0) = 0$ і $\dot{y}(0) = 0$, де V_0 – швидкість кулі в момент її дотику до поверхні металевої броні.

Вважається, що перший етап (проникнення) триватиме до того моменту, поки буде виконуватись нерівність (7)

$$F_{np}(t) \sin(\alpha + \varphi(t)) < R_{onip}, \quad (7)$$

де R_{onip} – узагальнена сила опору металевої броні, величина якої залежить від фізико-механічних властивостей взаємодіючих тіл та геометричних параметрів кулі.

В момент часу, коли величина сили пружності задовольняє рівняння (8)

$$F_{np}(t_k) \sin(\alpha + \varphi(t_k)) = R_{onip}, \quad (8)$$

завершується перший етап співудару кулі та металевої броні і починається наступний етап – пробивання броні кулею.

Система диференціальних рівнянь (6) є нелінійною, і отримати її аналітичний розв'язок проблематично. Тому розв'язок цієї системи рівнянь отримуємо, використовуючи математичне забезпечення MathCAD з чисельним методом Odesolve.

Під час здійснення підрахунків брались наступні значення: $m = 0,0096 \text{ кг}$ – маса кулі; $L = 0,0323 \text{ м}$ – довжина кулі; $b = 0,00762 \text{ м}$ – діаметр кулі, $I_C = 0,881 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції кулі відносно осі перпендикулярної до площини рисунка (рис. 1) та яка проходить через її центр мас, $I_C = \frac{m(b^2 + L^2)}{3}$.

Оскільки значення величини F_{mp} , c і R_{onip} , які залежать від фізико-механічних властивостей взаємодіючих тіл та їх геометричних параметрів, можна визначити лише експериментальним шляхом, тому розрахунки здійснювались при значному діапазоні зміни їх величин.

На рис. 3 і рис. 4 вказані залежності кута повороту кулі і її кутової швидкості при наступних значеннях величин $F_{mp} = 500 \text{ н}$, $R_{onip} = 40000 \text{ н}$, $\alpha = 60^\circ$ і $V_0 = 800 \text{ м/с}$.

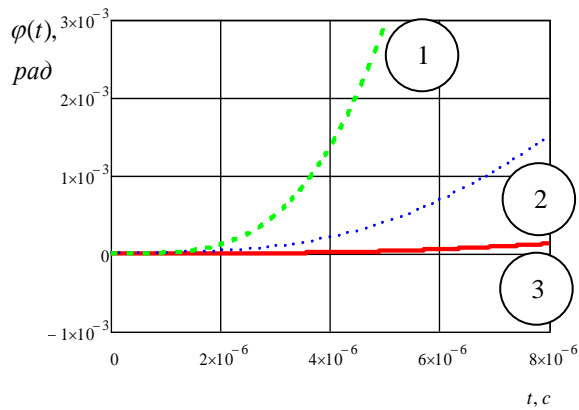


Рис. 3. Залежності зміни кута повороту кулі від часу при різних значеннях жорсткості матеріалу кулі:

1 – жорсткість $c = 36 \cdot 10^9 \text{ Н/М}$, 2 – жорсткість $c = 36 \cdot 10^8 \text{ Н/М}$, 3 – жорсткість $c = 36 \cdot 10^7 \text{ Н/М}$

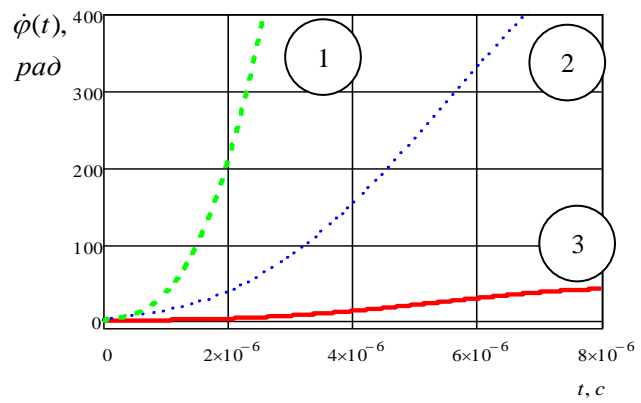


Рис. 4. Залежності зміни кутової швидкості кулі від часу при різних значеннях жорсткості матеріалу кулі:

1 – жорсткість $c = 36 \cdot 10^9 \text{ Н/М}$, 2 – жорсткість $c = 36 \cdot 10^8 \text{ Н/М}$, 3 – жорсткість $c = 36 \cdot 10^7 \text{ Н/М}$

Таблиця 1

Наприклад, при таких даних $F_{\text{тпр}} = 5000 \text{ Н}$, $c = 36 \cdot 10^8 \text{ Н/М}$, $R_{\text{опір}} = 40000 \text{ Н}$ і $\alpha = 60^\circ$ отримали такі значення величин

| $V_0, (\text{М/с})$ | $t_k, (\text{с})$ | $x(t_k), (\text{М})$ | $\dot{x}(t_k), (\text{М/с})$ | $\varphi(t_k), (\text{рад})$ | $\dot{\varphi}(t_k), (\text{с}^{-1})$ | $y(t_k), (\text{М})$ |
|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 400 | $9,7 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 382 | $5,0 \cdot 10^{-3}$ | 1154 | $0,74 \cdot 10^{-4}$ |
| 500 | $7,7 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 485 | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | 919 | $0,44 \cdot 10^{-4}$ |
| 600 | $6,4 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 588 | $2,1 \cdot 10^{-3}$ | 763 | $0,29 \cdot 10^{-4}$ |
| 700 | $5,5 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 690 | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | 653 | $0,21 \cdot 10^{-4}$ |
| 800 | $4,8 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 791 | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | 571 | $0,15 \cdot 10^{-4}$ |

Таблиця 2

Для таких самих значень, але при $\alpha = 30^\circ$, результати обчислень наступні

| $V_0, (\text{М/с})$ | $t_k, (\text{с})$ | $x(t_k), (\text{М})$ | $\dot{x}(t_k), (\text{М/с})$ | $\varphi(t_k), (\text{рад})$ | $\dot{\varphi}(t_k), (\text{с}^{-1})$ | $y(t_k), (\text{М})$ |
|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 400 | $2,2 \cdot 10^{-5}$ | 0,00861 | 324 | $2,6 \cdot 10^{-2}$ | 2982 | $0,53 \cdot 10^{-3}$ |
| 500 | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | 0,00867 | 441 | $1,6 \cdot 10^{-2}$ | 2339 | $0,25 \cdot 10^{-3}$ |
| 600 | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | 0,00870 | 551 | $1,1 \cdot 10^{-2}$ | 1930 | $0,14 \cdot 10^{-3}$ |
| 700 | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | 0,00872 | 659 | $0,79 \cdot 10^{-2}$ | 1646 | $0,91 \cdot 10^{-4}$ |
| 800 | $1,1 \cdot 10^{-5}$ | 0,00873 | 764 | $0,61 \cdot 10^{-2}$ | 1435 | $0,63 \cdot 10^{-4}$ |

Висновки

Аналізуючи значення величин у таблицях 1 і 2, і результати при інших значеннях параметрів F_{mp} , c , α і R_{onip} , які не приведені туг, можна стверджувати:

- із зростанням швидкості кулі V_0 тривалість співудару тіл t_k зменшується;
- переміщення центру мас кулі $x(t_k)$ вздовж осі Ox за час співудару тіл t_k суттєво не змінюється із зростанням швидкості V_0 ;
- швидкість кулі V в процесі співудару тіл зменшується;
- величина кута обертання кулі $\varphi(t_k)$ відносно точки E , за час співудару тіл $[0; t_k]$ збільшується, тобто напрямком швидкості кулі, змінюючись, намагається зайняти перпендикулярне положення до площини поверхні металевої броні;
- суттєвим під час співудару тіл є велике значення кутової швидкості кулі $\dot{\varphi}(t_k)$, і чим більша початкова швидкість кулі V_0 , то її величина буде менша;
- переміщення центру мас кулі $y(t_k)$ вздовж осі Oy за час співудару тіл $[0; t_k]$ зменшується із зростанням початкової швидкості V_0 ;
- при збільшенні жорсткості кулі c тривалість етапу проникнення і кутова швидкість кулі зменшуються;
- збільшення величини сили опору металевої броні R_{onip} супроводжується збільшенням тривалості етапу проникнення і можливістю явища рикошету;

- при зменшенні кута, між напрямком початкової швидкості кулі \vec{V}_0 і дотичною до поверхні металічної броні, тривалість етапу проникнення збільшується і можливе явище рикошету.

Список використаних джерел

1. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грецул Л.Б., Курран Д.Р. Динамика удара: Пер. с англ. / Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. – М.: Мир, 1985. – 296 с., ил. Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф.
2. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. – М.: Изд. РадиоСофт. 2008. – 406 с.
3. Самогонян А.Я. Динамика пробивания преград. – М.: Изд. МГУ, 1988. – 221 с.
4. Частные вопросы конечной баллистики / Под.ред. В.А. Григоряна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С. 592.
5. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. – М.: Стройиздат, 1965. – 448 с.
6. Сокіл Б.І., Стацук М.Г., Петрученко О.С. Залишкові напруження в циліндричному елементі ствола під тиском // Львів: АСВ, 2012. – №2(7). – С. 112-116.
7. Петрученко О.С., Хитряк О.І., Величко Л.Д. Зменшення ефективної дії кулі, осколка снаряду на об'єкт захисту // Львів: АСВ, 2015. – №12. – С. 65-69.
8. Петрученко О.С. Щодо вивчення взаємодії кулі чи осколка снаряда з перешкодою // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – Одеса: ВА, 2015. – Вип. 2(4).

Рецензент: д.фіз-мат.н., проф. М. Г. Стацук, фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів.

Динамические и кинематические характеристики этапа проникновения пули в броню

О.С. Петрученко, О.В. Флюд, Л.Д. Величко

В работе проведен анализ динамических и кинематических характеристик при ударе взаимодействующих твердых тел на первом этапе проникновения с учетом основных характеристик, а именно: формы, скорости в момент взаимодействия, распространения упругих, пластических и ударных волн, скорости деформации, прочее. Установлены зависимости жесткости от времени взаимодействия твердых тел.

Ключевые слова: поражающий элемент, металлическая броня, взаимодействие тел, удар, проникновение.

Dynamic and kinematic characteristics penetration phase of bullet in armor

O. Petruchenko, O. Flyud, L. Velychko

This article analyzes the dynamic and kinematic characteristics of interacting with the impact of solids in the first stage of penetration in view of the main features, namely the shape, the speed at the moment of interaction of elastic, plastic and shock waves, warp speed, more. Established stiffness depending on time of interaction solids.

Keywords: strike element, plate armor, interaction of solids, impact, penetration.