

Визначення критичної швидкості пробиття мішеней зі сплавів алюмінію та магнію

В. А. Гончарук, Б. О. Галанов, М. О. Єфімов,
І. В. Гончарова*, В. Ю. Цивіліцин

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
Україна, 03142, Київ, вул. Омеляна Пріцака, 3

*E-mail: i.goncharova@ipms.kyiv.ua

Аналітичним шляхом отримано формулу розрахунку критичної швидкості пробиття матеріалів недеформованим ударником, яка не містить емпіричних коефіцієнтів, та запропоновано удосконалене рівняння для розрахунку опору матеріалу мішені. Методика випробувана експериментально при пробиванні мішеней зі сплавів алюмінію та магнію двома типами ударників. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями критичної швидкості пробиття не перевищує 4%.

Ключові слова: рівняння руху, ударник, мішень, критична швидкість, сплави алюмінію та магнію.

Вступ

Процеси пробиття мішеней є досить складними та комплексними, тому що характеризуються великою кількістю параметрів. Тому їх вивчення стримується відсутністю розвинутого математичного апарату, хоча певні успіхи в цьому напрямку є [1—3]. У зв'язку з цим особливе значення в моделюванні процесів механіки пробивання надається експериментальним дослідженням та побудові феноменологічних моделей пробивання.

Найважливішою характеристикою матеріалу мішені є критична швидкість пробиття V_{cr} . У роботі [4] за V_{cr} приймається мінімальна швидкість польоту ударника, коли він має місце пробиття, тобто швидкість, за якої ударник виходить на тильну сторону мішені з нульовою швидкістю. За Дж. Герінгом, V_{cr} визначається як мінімальна швидкість ударника, яку може витримати мішень без наскрізного пробиття [5]. Викладені в роботах [5, 6] підходи до визначення V_{cr} дають досить громіздкі формули з низкою емпіричних коефіцієнтів, що значно ускладнює розрахунок.

Оскільки процес проникнення ударника при пробиванні мішені має багато спільного з процесом індентування матеріалу жорстким індентором, у даній роботі на основі раніше розвинених авторами уявлень про процес індентування [7] запропоновано просту методику визначення критичної швидкості пробиття матеріалів ударниками різних типів, яка дозволяє розрахувати V_{cr} із задовільною точністю.

Теоретична частина

У моделі Олексіївського—Тейта [8, 9] рівняння руху ударника, який не деформується в нескінченній мішені, має вигляд

$$\rho_p L \frac{du}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_t u^2 - R, \quad u(0) = u_s, \quad (1)$$

де ρ_p — щільність матеріалу ударника; L — довжина ударника; u — швидкість руху контактної поверхні; t — час; ρ_t — щільність матеріалу мішені; R — статичний penetраційний опір матеріалу мішені; u_s — швидкість удару.

Рівняння (1) є рівнянням зі змінними, що розділяються:

$$-\frac{dU}{1/2\rho_t U^2 + R} = \frac{1}{\rho_p L_p} dt.$$

Помноживши обидві частини на $\rho_t/2$, отримаємо

$$-\frac{dU}{U^2 + 2R/\rho_t} = \frac{\rho_t}{2\rho_p L_p} dt,$$

позначимо $a^2 = \frac{2R}{\rho_t}$ і маємо

$$-\frac{dU}{U^2 + a^2} = \frac{\rho_t}{2\rho_p L_p} dt. \quad (2)$$

Проінтегруємо обидві частини:

$$-\int_{u_s}^U \frac{dU}{U^2 + a^2} dU = \int_0^t \frac{\rho_t}{2\rho_p L_p} dt.$$

У лівій частині маємо табличний інтеграл. Для зручності помінявши місцями ліву та праву частини рівняння, можемо записати

$$\begin{aligned} \frac{\rho_t}{2L\rho_p} t &= \frac{1}{2} \left(\arctg \frac{u_s}{a} - \arctg \frac{u}{a} \right) \\ u(t) &= a \frac{u_s - a \cdot \arctg \left(\frac{a\rho_t t}{2L\rho_p} \right)}{a - u_s \left(\frac{a\rho_t t}{2L\rho_p} \right)}. \end{aligned} \quad (3)$$

З рівняння (2) для визначення глибини проникнення P маємо

$$P = \int_0^t u(\tau) d\tau = - \int_{u_s}^u \frac{2\rho_p L}{\rho_t} \frac{du}{a^2 + u^2} = \frac{\rho_p L}{\rho_t} \ln \frac{a^2 + u_s^2}{a^2 + u^2}. \quad (4)$$

Критичну швидкість пробиття V_{cr} можна визначити з рівняння (4) як швидкість удару $u_s = V_{cr}$, за якою ударник зупиняється ($u = 0$) і його тіло залишається в мішені (тобто глибина проникнення відповідає товщині мішені $P = h$, де h — товщина мішені). Таким чином, отримуємо

$$h = \frac{\rho_p L}{\rho_t} \ln \left(1 + \frac{V_{cr}}{a^2} \right). \quad (5)$$

Звідси для швидкості V_{cr} маємо

$$V_{cr} = a \sqrt{\exp \frac{\rho_t h}{\rho_p L} - 1} = \sqrt{\frac{2R}{\rho_t} \left(\exp \frac{\rho_t h}{\rho_p L} - 1 \right)}, \quad (6)$$

$$V_{cr}^2 = \frac{2R}{\rho_t} \cdot (e^\alpha - 1), \quad (7)$$

де коефіцієнт $\alpha = \frac{\rho_t h_t}{\rho_p L_p}$.

У роботі [10] Хіллом оцінено опір проникнення в пружно-ідеально пластичний матеріал мішені як

$$R = \frac{2}{3} Y \left(1 + \ln \frac{E}{3Y(1-\nu)} \right), \quad (8)$$

де Y — границя плинності матеріалу мішені, яка відповідає $\sigma_{0,2}$; E — модуль Юнга матеріалу мішені; ν — коефіцієнт Пуассона матеріалу мішені.

У роботі [9] для оцінки опору матеріалу мішені проникненню кінетичного ударника використано характеристику пластичності δ_H , яка визначається при індентуванні як частка пластичної деформації у загальній деформації, характеризуючи таким чином здатність матеріалу до пластичної деформації.

Для того щоб виділити частину опору, пов'язану з пластичною деформацією матеріалу під час проникнення кінетичного ударника, нами запропоновано розраховувати опір матеріалу мішені з урахуванням його пластичності за удосконаленою формулою

$$R' = R \cdot \delta_H = \frac{2}{3} Y \left(1 + \ln \frac{E}{3Y(1-\nu)} \right) \cdot \delta_H. \quad (9)$$

Таким чином, для визначення критичної швидкості пробиття матеріалів V_{cr} за формулою (7) значення опору матеріалу мішені R' будемо розраховувати за формулою (9).

Експериментальна частина

У табл. 1 наведено склад та властивості сплавів, з яких були виготовлені мішені, у табл. 2 — щільність та геометричні розміри ударників двох типів, за допомогою яких вивчали високошвидкісну взаємодію з матеріалом.

З метою перевірки відповідності теорії експерименту проведено балістичні випробування — високошвидкісне впровадження ударників двох типів у мішені, виготовлені з чотирьох сплавів. Випробування здійснювали у балістичних лабораторіях ДНДІ “Спецтехніка” та Національної Академії Оборони України. Швидкість ударника визначали за допомогою приладу “Політ” з точністю 0,1 м/с.

Т а б л и ц я 1. Характеристики сплавів мішеней

Марка сплаву	Хімічний склад, % (мас.)	Фізико-механічні властивості				
		ρ , кг/см ³	Y , МПа	E , ГПа	δ_H	ν
5083	Al—4,5Mg—0,8Mn—0,25Zn— 0,15Ti—0,4Fe—0,4Si	2,74	308	72	0,91	0,3 5
2139, обробка Т8	Al—5Cu—0,4Mn—0,4Mg— 0,15Fe—0,4Ag—0,1Si	2,77	476	72	0,885	0,34
K1	Al—4,45Mg—0,7Mn—0,15Cr	2,70	170	70,5	0,93	0,32
AZ31B	Mg—3,5Al—1,3Zn— 0,05Si—0,05Cu—0,04Ca— 0,005Fe—0,005Ni	1,77	201	43	0,9	0,3

Т а б л и ц я 2. Характеристики ударників

Ударник	Щільність ρ_p , кг/см ³	Діаметр d_p , мм	Довжина L_p , мм
#1	7,8	5,5	27
#2	7,8	10,9	43,5

Кожен експеримент включав серію балістичних випробувань: спочатку мішень (у вигляді плити) зазнавала вплив ударника зі швидкістю близькою до V_{cr} , яку попередньо розраховували теоретично за формулою (7). У разі пробією мішені (наскрізного отвору) швидкість ударника поступово знижували, поки не досягали виходу лише передньої частини ударника на тильний бік мішені. У випадку непробою, коли в мішені утворювалася лише лунка (тобто передня частина ударника не виходила на тильний бік мішені), швидкість поступово підвищували, досягаючи виходу передньої частини ударника на тильний бік мішені.

За критичну швидкість пробивання V_{cr} приймали швидкість, коли передня частина ударника виходила на тильний бік, а сам ударник залишався у тілі мішені. Таким чином, для ряду мішеней різної товщини експериментально отримано значення V_{cr} .

Значення критичної швидкості пробивання для сплавів 2139 та AZ31B запозичені з літератури [11, 12] відповідно (точки на рис. 1, а, б), а для сплавів 5083 та K1 використовували експериментальні результати власних досліджень авторів роботи (точки на рис. 2 та 3).

Також для всіх чотирьох сплавів теоретично розраховано значення V_{cr} за формулою (7) з урахуванням опору R' мішеней (за формулою (9)) та побудовано теоретичні залежності критичної швидкості пробиття від товщини мішеней $V_{cr}(h)$, які зображено пунктирними лініями на рис. 1—3.

Проведено оцінку відносної похибки розбіжності теорії та експерименту (Δ) за формулою

$$\Delta = \left| \frac{V_{cr}^{\text{експеримент}} - V_{cr}^{\text{розрахунок}}}{V_{cr}^{\text{розрахунок}}} \right| \cdot 100\% .$$

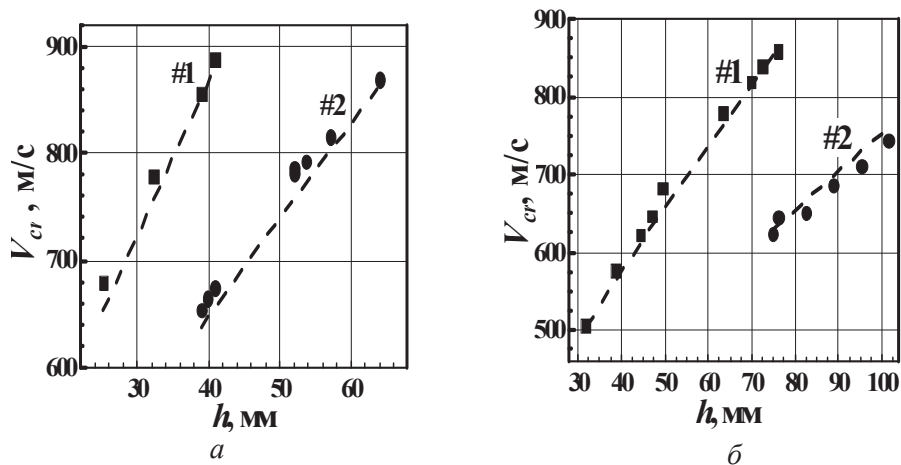


Рис. 1. Залежності критичної швидкості пробиття V_{cr} ударниками #1 і #2 від товщини h мішені зі сплавів 2139 (а) та AZ31B (б).

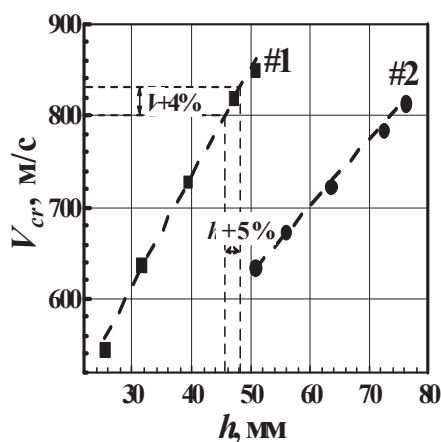


Рис. 2. Залежність критичної швидкості пробиття V_{cr} ударниками #1 і #2 від товщини h мішені зі сплаву 5083. Додатково показано, як підвищення товщини мішені впливає на V_{cr} .

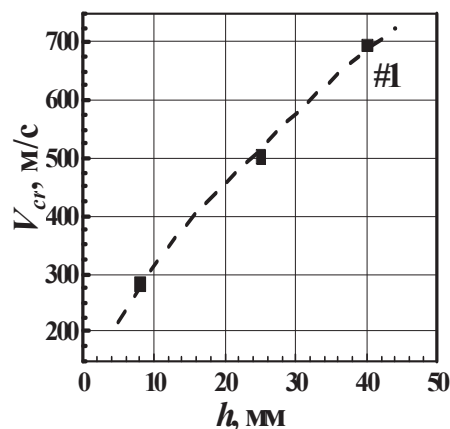


Рис. 3. Залежність критичної швидкості пробиття V_{cr} ударником #1 від товщини h мішені зі сплаву K1.

Отримано значення середньої $\Delta = 1,8\%$ та максимальної похибок $\Delta = 3,8\%$. Таким чином, для забезпечення надійного гарантованого захисту від відомого ударника під час проектування захисного елемента необхідно завищувати на 4% розрахункове значення V_{cr} . Так, на рис. 2 для сплаву 5083 показано, що при зростанні критичної швидкості на 4% товщина мішені, відповідно, також зростає на $\approx 4\text{—}5\%$.

Висновки

У роботі аналітичним шляхом отримано формулу розрахунку критичної швидкості пробиття матеріалів недеформованим ударником V_{cr} (7) та запропоновано удосконалене рівняння (9) для розрахунку опору R'

матеріалу мішені. Цю методику випробувано при пробиванні мішеней зі сплавів алюмінію та магнію двома типами ударників.

Отримане рівняння (7) не містить емпіричних коефіцієнтів і дозволяє розрахувати критичну швидкість пробивання V_{cr} з відомих геометричних та фізико-механічних властивостей мішені та ударника.

Експериментальні та теоретичні значення V_{cr} мають гарний збіг, при цьому максимальна похибка розбіжності становить 3,6%.

Список літератури

1. Mutu H.B., Ozer A. Experimental and finite element analysis of ballistic properties of composite armor made of alumina, carbon and UHMWPE. *Polymer Composites*. 2024. Vol. 7. doi: 10.1002/pc.28739
2. Wilkins M.L. Mechanics of penetration and perforation. *Int. J. Eng. Sci.* 1978. Vol. 16. P. 793—807. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90066-6)
3. Jiao L., Bailin Zh., Kai Zh., Biao Y., Xiaoqiang Y. Ballistic performance and energy absorption characteristics of thin nickel-based alloy plates at elevated temperatures. *Int. J. Impact Eng.* 2019. Vol. 126. P. 160—171. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.12.012>
4. Jia D., Xu Y., Wang L., Zhu J., Zhang W. Study of the ballistic impact behavior of protective multi-layer composite armor. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2024. Vol. 140 (1). P. 171—199. doi: 10.32604/cmes.2024.046703
5. Gehring J.W. Theory of impact on thin targets and shields and correlation with experiment. *High-Velocity Impact Phenomena* / Ed. Ray Kinslow. Academic Press, 1970. P. 105—156.
6. Walters W., Williams C., Normandia M. An explicit solution of the Alekseevski–Tate penetration equations. *Int. J. Impact Eng.* 2006. Vol. 33 (1). P. 837—846. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.057
7. Milman Yu.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Goncharuk V.A., Yefimov N.A. Physics of deformation and fracture at impact loading and penetration. *Int. J. Impact Eng.* 2006. Vol. 10. P. 452—462. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.058>
8. Alekseevskii V.P. Penetration of a rod into a target at high velocity. *Combust. Explos. Shock Waves*. 1966. Vol. 2. P. 63—66. <https://doi.org/10.1007/BF00749237>
9. Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact. *J. Mech. Phys. Solids*. 1967. Vol. 15. P. 387—399. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(67\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0022-5096(67)90010-5)
10. Hill R. The mathematical theory of plasticity. Oxford: Calderon Press, 1985. 355 p.
11. Cheeseman B., Gooch W., Burkins M. Ballistic evaluation of aluminum 2139-T8. *Proc. 24th Int. Symposium on Ballistics* (USA, New Orleans, Louisiana, September 22—26, 2008). New Orleans, 2008.
12. Jones T.L., DeLorme R.D. Development of ballistic specification for magnesium alloy AZ31B. *Army Research Laboratory* (USA). 2008. No. ARL-TR-4664. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=591b052523cec0dc0bd59283750e4dee8c7d61b> (Дата звернення: 02.10.2024)

References

1. Mutu, H. B., Ozer, A. (2024). Experimental and finite element analysis of ballistic properties of composite armor made of alumina, carbon and UHMWPE. *Polymer Composites*, Vol. 7. doi: 10.1002/pc.28739
2. Wilkins, M. L. (1978). Mechanics of penetration and perforation. *Int. J. Eng. Sci.*, Vol. 16, pp. 793—807. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90066-6](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90066-6)
3. Jiao, L., Bailin, Zh., Kai, Zh., Biao, Y., Xiaoqiang, Y. (2019). Ballistic performance and energy absorption characteristics of thin nickel-based alloy plates at elevated temperatures. *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 126, pp. 160—171. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.12.012>
4. Jia, D., Xu, Y., Wang, L., Zhu, J., Zhang, W. (2024). Study of the ballistic impact behavior of protective multi-Layer composite armor. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol. 140 (1), pp. 171—199. doi: 10.32604/cmescs.2024.046703
5. Gehring, J. W. (1970). Theory of impact on thin targets and shields and correlation with experiment. *High-Velocity Impact Phenomena* / Ed. Ray Kinslow, Academic Press, pp. 105—156.
6. Walters, W., Williams, C., Normandia, M. (2006). An explicit solution of the Alekseevski–Tate penetration equations. *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 33 (1), pp. 837—846. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.057
7. Milman, Yu. V., Chugunova, S. I., Goncharova, I. V., Goncharuk, V. A., Yefimov, N. A. (2006). Physics of deformation and fracture at impact loading and penetration. *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 10, pp. 452—462. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.058>
8. Alekseevskii, V. P. (1966). Penetration of a rod into a target at high velocity. *Combust. Explos. Shock Waves*, Vol. 1, 2, pp. 63—66. <https://doi.org/10.1007/BF00749237>
9. Tate, A. (1967). A theory for the deceleration of long rods after impact. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 15, pp. 387—399. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(67\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0022-5096(67)90010-5)
10. Hill, R. (1985). *The mathematical theory of plasticity*. Oxford: Calderon Press, 355 p.
11. Cheeseman, B., Gooch, W., Burkins, M. (2008). Ballistic evaluation of aluminum 2139-T8. *Proc. 24th Int. Symposium on Ballistics*, USA, New Orleans, Louisiana.
12. Jones, T. L., DeLorme, R. D. (2008). Development of ballistic specification for magnesium Alloy AZ31B. *Army Research Laboratory (USA)*. No. ARL-TR-4664. Retrieved from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=591b052523cecb0dc0bd59283750e4dee8c7d61b>

Determination of the critical penetration rate of targets from aluminum and magnesium alloys

V. A. Goncharuk, B. O. Galanov, M. O. Iefimov, I. V. Goncharova*,
V. Yu. Tsivilitsin

I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science
of NAS of Ukraine, Kyiv

*E-mail: i.goncharova@ipms.kyiv.ua

The motion of a non-deformable kinetic projectile of cylindrical shape in a continuous homogeneous semi-infinite medium is considered based on the well-known Alekseevsky-Tate model. As a result of solving the differential equation of motion of the impactor, the dependence of its speed on the penetration depth was obtained. The boundary conditions are: before penetrating the target, the speed of the impactor is equal to the critical penetration speed, and after penetrating the thickness of the target, the speed of the impactor is equal to zero. A simple formula for calculating the critical velocity of target penetration V_{cr} is obtained based on this dependence. This formula does not contain empirical coefficients. Therefore, the calculation of V_{cr} requires a minimum of information about both the material of the projectile and the target. An improved equation for calculating the resistance of the target material is also proposed. For targets from aluminum and magnesium alloys, critical penetration rates depending on their thickness were theoretically calculated and penetration curves were plotted. Also, the critical penetration velocity for targets from these alloys was determined experimentally during ballistic tests the results of the authors' own research and taken from the literature. A good agreement between the experimental data and theoretical calculations of the critical penetration velocity is observed, with the calculation error not exceeding 4%. With regard to the assessment of the critical thickness of the target, the maximum error will be about 5%, the average – 2,5%. It is assumed that in order to provide the reliable guaranteed protection against a known projectile, it is necessary to overestimate by 4% the calculated value of the critical penetration velocity while designing the protective element.

Keywords: equation of motion, impactor, target, critical velocity, aluminum alloys, magnesium alloys.