

## ОСОБЛИВОСТІ ПЕРФОРАЦІЇ ПЛАСТИН ЗІ СТАЛІ 30ХН2МА ПІД ВПЛИВОМ ВІБРАЦІЇ

Свиридов С. О.<sup>1</sup>, Балакін В. Ф.<sup>2</sup>, Балаханова Т. В.<sup>3</sup>, Гавриляк Р.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ПАТ «Запоріжсталь», Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup> Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

<sup>3</sup>Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

**Анотація:** В роботі досліджено особливості руйнування та деформації металевих пластин зі сталі марки 30ХН2МА після балістичних випробувань. Особливістю експерименту було те, що під час випробування на частину пластин додатково була накладено вібрація частотами 10 та 20 Гц. Виявлено перспективність впливу вібрації на балістичну стійкість пластин. Після експерименту в статичних пластинах наскрізні отвори фрагментаційного та пелюсткового типів з подальшим розтріскуванням. Розтріскування поширювалося вглиб недеформованої пластини. Накладення вібрації показало суттєве покращення балістичних властивостей. При застосуванні комбінованого випробування було виявлено зміна супротиву мішені. Зокрема була збільшена пластична складова руйнування та виявлені фрагменти кулі, що залишилися на лицьовій поверхні пластини після випробування. Показано, що подальше застосування вібрації є перспективним напрямом підвищення балістичної стійкості матеріалів.

**Ключові слова:** балістична стійкість, фрагментація, вібраційна обробка, механізм руйнування, мікроструктура.

Постійний розвиток систем озброєнь, безперервні військові дії призводять до необхідності посиленого захисту як людей, так і різних об'єктів. Попри постійні розробки та дослідження нових матеріалів, одним із найпоширеніших матеріалів для використання як захисного елемента бронезилетів, панцирних укріплень тощо, є металеві пластини різної твердості та товщини. Оскільки захисні матеріали повинні мати не тільки високу балістичну стійкість, але й бути легкими, надійними, відрізнятися простотою виготовлення, вчені шукають шляхи підвищення захисних характеристик наявних матеріалів – покращення структурного стану матеріалу при збереженні його твердості [1, 2], використання перфорованих пластин [3, 4], багат шарових [5, 6] та зверхтвердих пластин [7], високоентропійних сплавів [8] та пластин зі специфічним рельєфом поверхні [6, 9]. Існують розробки, що

показують вагомий вплив відхилення мішені від нормального положення щодо траєкторії снаряда/кулі на результати балістичних випробувань [10-12]. При чому відхилення відразу по кількох осях викликає більший ефект [13-14]. Крім цього в реальних умовах на пластину часто впливає спершу вибухова хвиля і потім вже наступний удар уламками, тобто пластина зазнає одночасно кількох дій – деформацію від вибухової хвилі та балістичний удар [15]. Таким чином вивчення поведінки металевої пластини при балістичних випробуваннях під додатковим зовнішнім впливом є актуальним та маловивченим напрямом досліджень.

Зовнішнім чинником на мішень було обрано вібраційне навантаження. На сьогодні віброобробка використовується не тільки як вплив на ванну розплаву при литті та зварювальних процесах для подрібнення структури, що твердне, але і як ефективний спосіб перерозподілу та зняття залишкових напружень металовиробів [16, 17].

В роботі було вивчено поведінку металевої пластини зі сталі марки 30XH2MA товщиною 6,7 мм при балістичних випробуваннях. Пластини були жорстко прикріплені до основи. Для стрілянини використовувалася гвинтівка МКМ-072. Стріляли з відстані 10 м кулями зі сталевим осердям калібру 7,62×39 мм під кутом 90° до досліджуваних зразків. Випробування проводилися як зі застосуванням вібрації, так і за її відсутності. Було використано вібрацію частотами 10 та 20 Гц. Оскільки вібраційний вплив був нерезонансний використано широкий набір амплітуд (від 0,1 до 4 мм).

За результатами випробувань у всіх випадках статичного положення пластини відбулося наскрізне пробиття. На місці удару були утворені отвори різного вигляду. За більшістю випадків руйнування пластини відбувалося шляхом фрагментації, діаметр отвору, що виник, відповідав розміру кулі (рис. 1, а). В деяких випадках спостерігалось виникнення пелюсткоподібної форми з виникненням тріщини (рис. 1, б). Але суттєвих проявів пластичного деформування у всіх випадках руйнування статичної пластини не виявлено. Розтріскування та відшарування тильної сторони плити не спостерігалось за

всіх режимів балістичних випробувань. Це пояснюється першочергово невеликою твердістю металу (НВ 295).

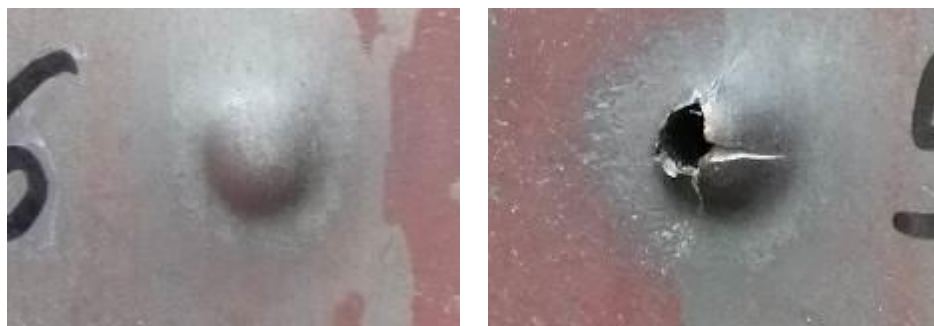


а

б

Рисунок 1 – Перфоровані ділянки статичної пластини: а – пластично-фрагментаційна перфорація, б – пелюсткова перфорація з додатковим розтріскуванням тильної сторони

Однак застосування вібрації суттєво підвищило балістичну стійкість на пластинах навіть такої невисокої твердості. Застосування вібрації частотою 10 Гц показало покращення характеристик (6 зразків з 9 не були перфоровані – рисунок 2, а). У зразках, які не пройшли випробування було помітно більший рівень пластичної складової (опуклість місця виходу кулі). При цьому розтріскування не поширювалося далі опуклої частини металу (рис. 2, б).



а

б

Рисунок 2 – Зразки пластини після балістичного випробування з вібраційним навантаженням 10 Гц: а – зразок, що витримав випробування, б – пластично-пелюсткова перфорація з додатковим розтріскуванням опуклої сторони

Застосування вібрації 20 Гц показало більш стабільний результат. За цим режимом не виявлено перфорованих зразків. В результаті балістичних випробувань виникли ямки на фронтній частині металевої пластини (рис. 3). Спостерігалась тенденція збільшення висоти опуклостей зі збільшенням значення амплітуди вібраційної обробки. В деяких спостерігалось зародження

руйнування за суто фрагментаційним типом, тобто частка пластини усувається на кшталт корка (рис. 3, а). Деякі автори пов'язують такий тип руйнування з формою кулі, а саме з тупим носом. Таким чином під час удару при вібраційному навантаженні куля ефективно втратила частину вихідної кінетичної енергії. Завдяки вібрації куля відскочила навкопиль.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд зразків після балістичних випробувань, вібраційне навантаження 20 Гц: а – зразок з початком фрагментаційного руйнування, б – зразок з опуклістю

Металографічний аналіз виявив фрагменти поверхневої оболонки кулі на зразках пластини після випробування із застосуванням вібрації частотою 20 Гц (рис. 4).

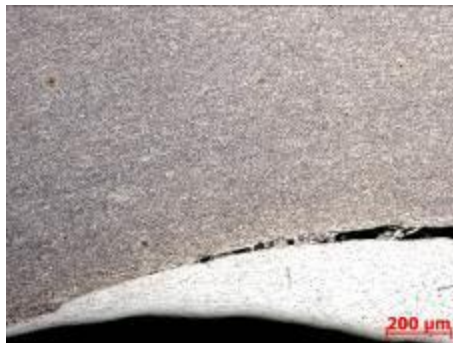


Рисунок 4 – Структура ямки зразка з фрагментом поверхневого матеріалу кулі після балістичних випробувань, вібрація 20 Гц,  $\times 100$

Це свідчить про деформацію та руйнування тіла кулі під час балістичних випробувань.

На підставі представленого комплексу експериментальних умов, що використовуються при балістичних випробуваннях металевих пластин зі сталі марки 30ХН2МА товщиною 6,7 мм, можна зробити наступні висновки.

Спільне застосування балістичного удару та вібраційного навантаження суттєво вплинуло на сприйнятливість мішені до удару, зміну характеру руйнування та призвело до зміни форми кулі та її часткового руйнування.

Отримані результати показують перспективність потенційного застосування вібраційної обробки під час проектування бронезахисних матеріалів.

#### **ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE**

1. Jo M., Kim S., Suh D., Kim H., Kim Y., Sohn S., Su L. Enhancement of ballistic performance enabled by transformation-induced plasticity in high-strength bainitic steel. *Journal of Materials Science & Technology*. – 2021. № 84. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.12.059
2. Pai A., Rodríguez M., Marcos B., Masuhiro V.-M., Borja S. Experimental techniques for performance evaluation of shielding materials and configurations subjected to Blast and Ballistic impacts: A State-of-the-Art Review. *Thin-Walled Structures*. – 2023. № 191. C. 111067. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111067
3. Puica C., Trană E., Pupaza C., Turtoi, C., Rotariu A., Pană I.-F. Experimental and Numerical Study on Perforated Plate Mitigation Capacity to Near-Field Blasts. *Materials*. – 2023. № 16. C. 4255. DOI: 10.3390/ma16124255
4. Acar D., Canpolat B., Cora Ö. N. Ballistic performances of Ramor 500, Armox Advance and Hardox 450 steels under monolithic, double-layered, and perforated conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2024. № 51. C. 101653. DOI: 10.1016/j.jestch.2024.101653
5. Bekci M., Canpolat B., Usta E., Güler M., Cora Ö. N. Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2021. № 24. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.01.001
6. Jinnapat A., Doungkom C., Somton K., Dateraksa K. Ballistic performance of composite armor impacted by 7.62 mm armor projectile. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. – 2023. № 33. C.120-127. DOI: 10.55713/jmmm.v33i2.1698
7. Ryan S., Li H., Edgerton M., Gallardy D., Cimpoeu S. J. The ballistic performance of an ultra-high hardness armour steel: An experimental investigation. *International Journal of Impact Engineering*. – 2016. № 94. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.03.011
8. Muskeri S., Jannotti C., Schuster B., Lloyd J., Mukherjee S. Ballistic Impact Response of Complex Concentrated Alloys. *International Journal of Impact Engineering*. – 2021. № 161. C. 104091. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104091
9. Khalaf W., Hamzah M. Experimental and numerical studies of ballistic resistance of hybrid sandwich composite body armor. *Open Engineering*. – 2024. № 14. DOI: 10.1515/eng-2022-0543
10. Gupta C., Iqbal M. A., Mohammad Z., Baqi A., Gupta N. K. Energy absorption in thin metallic targets subjected to oblique projectile impact: A numerical study. *Thin-Walled Structures*. – 2017. № 126. DOI: 10.1016/j.tws.2017.08.005

11. Ryan S., Berk J., Weiss A., Yatom N., Vardy M., Rana S., Greenhill S., Venkatesh S. (2022). Adaptive Experimental Optimisation for Sample-Efficient Armour Design. – 2022. DOI: 10.12783/ballistics22/36177
12. Bekci, M. L., Canpolat B. H., Usta E., Güler M. S., Cora Ö. N. Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2021. № 24(4). C. 990-995. DOI: 10.1016/j.jestch.2021.01.001
13. Wei H., Zhang X., Liu C., Liu J., Li C. A three-dimensional penetration trajectory model for ogive-nosed projectile into metal targets. International Journal of Impact Engineering. – 2021. № 157. C. 103998. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103998
14. Fras T. On the effect of pitch and yaw angles in oblique impacts of small-caliber projectiles. Defence Technology. – 2024. № 31. C. 73-94. DOI: 10.1016/j.dt.2023.06.004
15. Li L., Zhang Q. C., Lu, T. J. Ballistic penetration of deforming metallic plates: Experimental and numerical investigation. International Journal of Impact Engineering. – 2022. № 170 C. 104359. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104359
16. Fayrushin A. M., Chernyatyeva R. R., Yakovleva D. N. The effects of vibration treatment in the process of welding on the structure of metal of seam weld. In IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. – 2020. № 6. C. 459. DOI: 10.1088/1755-1315/459/6/062110
17. Naidu M. C., Padal K. T., Eshete G. Influence of Heat-Treated and Vibratory-Assisted Weld Joints on the Mechanical Properties of 304L SS Material. Journal of Nanomaterials. 2022. № 4. C. 1-9. DOI: 10.1155/2022/1000859

## **INFLUENCE FACTORS ON THE FORMATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF STEEL FOR MANUFACTURE OF RAILWAY AXES**

Sviridov Semen, Balakin Valeriy, Balakhanova Tetiana, Havryliak Vladyslav

**Abstract.** *The article investigated the features of the destruction and deformation of metal plates made of 30CrNi2Mo steel after ballistic tests. The peculiarity of the experiment was that during the test, the plates was additionally subjected to vibration at frequencies of 10 and 20 Hz. The perspective of the impact of vibration on the ballistic stability of plates has been revealed. After the experiment, through-holes of fragmentation and petal types with subsequent cracking were found in the static plates. Cracking propagates deep into the undeformed plate. The application of vibration showed a significant improvement in ballistic properties. When applying the combined test, a change in the resistance of the target was detected. Namely, the plastic component of the metal around the hole was increased and bullet fragments were found that remained on the surface of the plate after the test. It is shown that the further application of vibration is a promising direction for increasing the ballistic resistance of materials.*

**Keywords:** *ballistic resistance, fragmentation, vibration processing, destruction mechanism, microstructure*