

УДК 535.3:620.179.17

ОСОБЛИВОСТІ ФРАГМЕНТАЦІЇ НАВОДНЕНОЇ СТАЛІ 60С2А ЗА ВИПРОБУВАНЬ СТАТИЧНИМ ВИБУХОМ

І. М. ДМИТРАХ¹, А. М. СИРОТЮК¹, О. П. КРАСЮК², П. А. БОЛКОТ²,
О. Т. ЦИРУЛЬНИК¹, Р. Л. ЛЕЩАК¹, В. М. МАЛЮК², О. В. БРИЧИНСЬКИЙ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

Для підвищення фрагментації середньовуглецевої сталі 60С2А в умовах статичного вибуху подано метод її попереднього оброблення електролітичним воднем. Запропоновано параметр P_f , який визначає кількість фрагментів сталі масою 4...5 г і більше на одиницю маси матеріалу. Встановлено, що зі зміною концентрації водню у сталі в межах 0,07...4,36 ppm його значення зростає на 25%. Порівняння описаного методу із методом попереднього гартування сталі засвідчило зростання параметра P_f на 56%, що вказує на його перспективність.

Ключові слова: середньовуглецева сталь, електрохімічне наводнювання, концентрація водню, навантаження статичним вибухом, параметри фрагментації.

To increase the fragmentation of medium-carbon 60C2A steel in the conditions of a static explosion, a method of its preliminary treatment with electrolytic hydrogen is proposed. The P_f parameter is proposed for evaluating the steel fragmentation, which determines the number of steel fragments weighing 4...5 g or more per weight unit of the material. It was found that when the hydrogen concentration in steel changes in the range of 0.07...4.36 ppm, the value of the P_f parameter increases by 25%. Comparison of the proposed method with the method of preliminary quenching of 60C2A steel showed an increase in the value of the P_f parameter by 56%, which indicates its perspective use.

Keywords: medium carbon steel, electrochemical hydrogen charging, hydrogen concentration, static explosion load, fragmentation parameters.

Вступ. Фрагментація середньовуглецевих сталей за ударного (динамічного) навантаження – важлива характеристика під час їх застосування у спеціальних виробках техніки. На сьогодні [1–5] можна виділити такі основні підходи підвищення фрагментації конструкційних вуглецевих сталей за їх навантаження вибухом: модифікація хімічного складу; термічна обробка; термохімічне азотування для створення поверхневого крихкого шару; лазерне мікросвердління матеріалу тощо.

Запропоновано і обґрунтовано [6, 7] відмінний від існуючих за фізичною суттю метод, який ґрунтується на специфічних проявах водневого окрихчення конструкційних металів та сплавів [8, 9], зокрема, на незворотності втрати їх пластичності та розвитку об'ємної мікропошкоженості під впливом водню. Це дало підставу застосовувати електролітичний водень як технологічне середовище для спеціального попереднього оброблення конструкційних середньовуглецевих сталей, щоб підвищити їх дефектність на мікроструктурному рівні. Також встановлено режими електрохімічного наводнювання (склад електроліту та густину струму катодної поляризації), за яких розвивається об'ємна мікропошкоженість сталі 60С2А, що проявляється у зниженні енергії руйнування E зразків під удар-

ним навантаженням. Виявлено кореляційну залежність між параметром E та концентрацією залишкового (пасткованого) водню C_H у металі.

Мета цього дослідження – встановити особливості фрагментації сталі 60C2A залежно від концентрації водню C_H у металі за випробувань в умовах статичного вибуху.

Методика експериментів. Використовували модельні циліндри [10–13] (рис. 1), виготовлені зі середньовуглецевої високоякісної сталі 60C2A. Її хімічний склад, згідно зі сертифікатом на продукцію, такий (mass%): 0,57...0,65 C, 1,6...2 Si, 0,6...0,9 Mn, < 0,025 S, < 0,025 P, < 0,3 Cr, ≤ 0,2 Cu, решта – Fe.

Циліндри заздалегідь наводнювали електрохімічним методом у гальваностатичному режимі, щоб одержати різні концентрації водню C_H у металі. Режими процесу вибирали згідно з одержаними раніше результатами [7]. Для цього використали модифікований комплекс устаткування для електрохімічних досліджень, який базується на динамічній електрохімічній лабораторії VoltaLab40 [14]. Концентрацію водню у зразках вимірювали аналізатором дифузійно-рухомого і залишкового водню LECO DH603 [15].

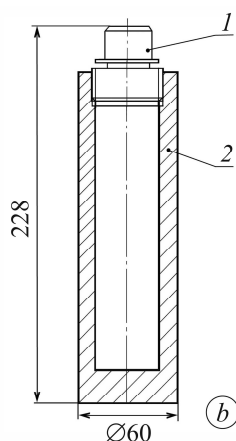


Рис. 1. Загальний вигляд (а) та геометричні розміри (b) модельного циліндра для випробувань сталі 60C2A статичним вибухом: 1 – кришка; 2 – корпус.

Fig. 1. General view (a) and geometrical dimensions (b) of a model cylinder for steel 60C2A testing by static explosion: 1 – plug; 2 – body.

Перед випробуваннями порожнини циліндрів заповнювали вибуховою речовиною марки С4 [16]. Руйнували за статичного вибуху [17, 18] у польових умовах на спеціальному майданчику, які були однакові для всіх циліндрів незалежно від ступеня їх наводнювання. Це дало змогу порівняти особливості їх фрагментації залежно від концентрації водню у металі. Результати фрагментації (утворення осколкових груп) аналізували статистичними методами.

Результати та їх обговорення. Після випробувань статичним вибухом залежно від концентрації водню у металі виявили (рис. 2) різну кількість фрагментів неоднакових форми і розмірів для кожного значення C_H у металі. Тут необхідно вказати, що концентрація $C_H = 0,07$ ppm відповідає заздалегідь ненаводненому циліндру, який містить незначну кількість залишкового металургійного водню.

Слід зазначити, що під час статистичного аналізу брали до уваги твердження [19, 20], що лише фрагменти масою більше 4...5 g мають ефективну вражаючу силу. Тому для кожного випробуваного циліндра відбирали тільки такі фрагменти і встановлювали їх кількість n_f , а також визначали сумарну масу всіх наявних фрагментів m_Σ . Кількісно фрагментацію циліндрів оцінювали за параметром

$$P_f = \frac{n_f}{m_\Sigma}, \quad (1)$$

який має розмірність number fragments/kg (кількість фрагментів масою 4...5 g і більше на одиницю маси сталі 60C2A).

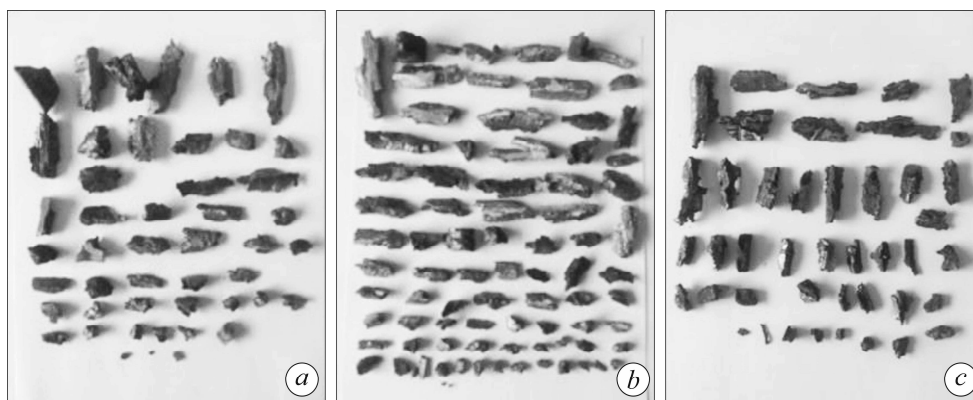


Рис. 2. Фрагментація циліндрів зі сталі 60C2A залежно від концентрації водню у металі після випробувань статичним вибухом: *a* – $C_H = 0,07$ ppm; *b* – 2,58 і *c* – 4,36.

Fig. 2. Fragmentation of cylinders manufactured of 60C2A steel depending on the concentration of hydrogen in the metal after testing under static explosion: *a* – $C_H = 0.07$ ppm; *b* – 2.58, and *c* – 4.36.

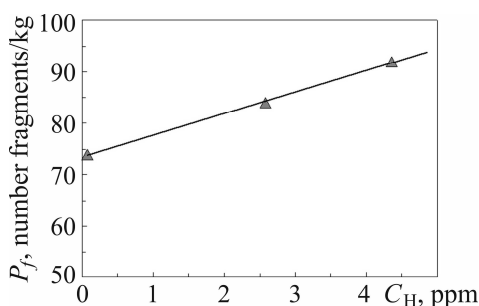
Для виконаних випробувань параметр P_f лінійно залежить від концентрації водню у металі (суцільна лінія на рис. 3):

$$P_f = 4,186 \cdot C_H + 73,546 . \quad (2)$$

Тут середнє квадратичне відхилення R^2 від експериментальних даних становить 0,9989 (трикутники на рис. 3).

Рис. 3. Залежність параметра фрагментації P_f циліндрів зі сталі 60C2A від концентрації водню у металі C_H .

Fig. 3. Dependence of the fragmentation parameter P_f of cylinders manufactured of 60C2A steel on the concentration of hydrogen in the metal C_H .



Значення параметра P_f під час наводнювання сталі до $C_H = 4,36$ ppm зростають приблизно на 25% проти ненаводненого матеріалу. Це є свідченням того, що попереднє оброблення електролітичним воднем підвищує фрагментацію сталі за статичного вибуху.

Порівнювали (рис. 4 і 5) особливості фрагментації сталі після запропонованого методу і поширеного методу її попереднього гартування [1, 6, 7]. Виявили, що у гартваному циліндрі збільшується загальна кількість фрагментів, однак, зменшуються їх розміри і маса (рис. 4*a*). Тобто менше “ефективних” осколків, маса яких перевищує 4...5 g. У циліндрі після наводнювання зменшується загальна кількість осколків, однак, збільшуються їх вага та розміри (рис. 4*b*). Це призводить до того, що параметр P_f для наводненого циліндра на 56% вищий, ніж для гартваного (рис. 5).

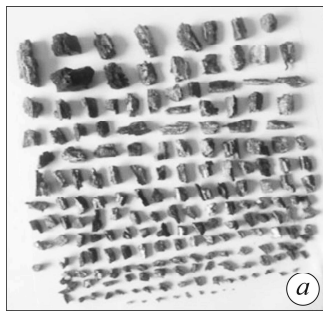


Рис. 4. Фрагментація циліндрів зі сталі 60С2А після випробувань статичним вибухом: *a* – гартування при 820°С і охолодження у воді; *b* – попереднє наводнювання до $C_H = 4,36$ ppm.

Fig. 4. Fragmentation of cylinders manufactured of 60C2A steel after their static explosion tests: *a* – quenching at 820°C and cooling in water; *b* – preliminary hydrogen-charging to $C_H = 4.36$ ppm.

Таким чином, метод попереднього оброблення сталі 60С2А електrolітичним воднем ефективніший для підвищення її фрагментації за статичного вибуху, а також переважає поширений метод її попереднього гартування.

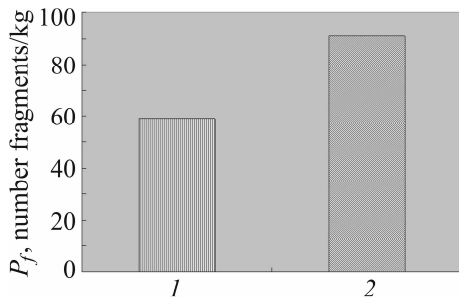


Рис. 5. Порівняння значень параметра фрагментації P_f циліндра, підданого гартуванню при 820°С і охоложеного у воді (1), а також заздалегідь наводненого до $C_H = 4,36$ ppm (2).

Fig. 5. Comparison of the fragmentation parameter P_f a cylinder quenched at 820°C and cooled in water (1) and a preliminary hydrogen-charged to $C_H = 4.36$ ppm (2).

ВИСНОВКИ

Встановлено, що попереднє оброблення сталі 60С2А електrolітичним воднем підвищує її фрагментацію за статичного вибуху. Для кількісної оцінки процесу запропоновано параметр P_f з розмірністю number fragments/kg (кількість фрагментів масою 4...5 g і більше на одиницю маси матеріалу). Виявлено його лінійну залежність від концентрації водню C_H у металі. Встановлено, що в діапазоні $0,07 \text{ ppm} \leq C_H \leq 4,36 \text{ ppm}$ значення P_f зростає на 25%. Порівняно запропонований метод підвищення фрагментації сталі 60С2А із поширеним методом її попереднього гартування і зафіксовано зростання параметра P_f на 56%, що вказує на його ефективність.

Робота виконана за фінансової підтримки Національної академії наук України в межах програми „Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень” на 2023–2024 роки (Договір № 3.2/24-П).

1. Villano D. and Galliccia F. Innovative technologies for controlled fragmentation warheads // J. of Appl. Mech., Trans. ASME. – 2013. – **80**, Is. 3. – Article number 031704. DOI: 10.1115/1.4023341
2. Natural fragmentation behavior of steel cylinders with variable charge geometries under detonation loading / Z.-X. Shen, H.-D. Huang, Z.-B. Cen, H. Chen, D. Wang, G.-R. Zhu, and S.-Q. Yuan // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2021. – **57**, Is. 2. – P. 246–255. DOI: 10.1134/S0010508221020143

3. *Experimental fragmentation of pipe bombs with varying case thickness* / L. A. da Silva, S. Johnson, R. Critchley, J. Clements, K. Norris, and C. Stennett // *Forensic Sci. Int.* – 2020. – **306**. – Article number 110034. DOI: 10.1016/j.forsciint.2019.110034
4. *Grady D. E. and Hightower M. M.* Natural fragmentation of exploding cylinders // *Shock wave and high-strain-rate phenomena in materials.* – 2023. – P. 713–722. DOI: 10.1201/9781003418146-65
5. *Grisaro H. Y., Benamou D., and Dancygier A. N.* Investigation of blast and fragmentation loading characteristics – Field tests // *Engin. Struct.* – 2018. – **167**. – P. 363–375. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.04.013
6. *Development of a method for controlled hydrogen fragmentation of medium-carbon steels to reduce their crack resistance* / V. R. Skalskyi, I. M. Dmytrakh, O. T. Tsyurulnyk, A. M. Syrotyuk, O. I. Zvirko // *Strength of Mat.* – 2023. – **55**, № 6. – P. 1101–1106. DOI: 10.1007/s11223-024-00600-4
7. *Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Цирульник О. Т.* Вплив електрохімічного наводнювання на втрату пластичності та розвиток об'ємної мікропошкоженості сталі 60С2А // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2024. – **60**, № 2. – P. 43–59.
8. *Dmytrakh I. M., Syrotyuk A. M., and Leshchak R. L.* Special diagram for hydrogen effect evaluation on mechanical characterizations of pipeline steel // *J. of Mat. Eng. and Performance.* – 2024. – **33**, Is. 7. – P. 3441–3454. DOI: 10.1007/s11665-023-08215-7
9. *Dmytrakh I., Syrotyuk A., and Leshchak R.* Role of electrochemically diffusible hydrogen in the initial damage of low-alloyed pipeline steel // *Current Topics in Electrochem.* – 2022. – **24**. – P. 27–35.
10. *RU Patent 2368691 C2.* Projectile with body from high-fragmentation siliceous steel of Odintsov–Botvina / V. A. Odintsov, L. R. Botvina. – Date of Patent: Oct. 20, 2008.
11. *United States Patent Number 3,566,794.* Controlled Fragmentation Warhead / J. C. Adams, T. S. Smith, J. B. Bickley. – Date of Patent: Oct. 20, 1992.
12. *Computational modeling of explosive-filled cylinders* / Jr. C. E. Anderson, W. W. Predebon, and R. R. Karpp // *Int. J. of Eng. Sci.* – 1985. – **23**, Is. 12. – P. 1317–1330. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(85\)90110-7](https://doi.org/10.1016/0020-7225(85)90110-7)
13. *Deformation and fragmentation behaviour of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations* / T. Hiroe, K. Fujiwara, H. Hata, and H. Takahashi // *Int. J. of Impact. Eng.* – 2008. – **35**, Is. 12. – P. 1578–1586. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.002>
14. *VoltaLab 40 (PGZ301 & VoltaMaster 4).* Dynamic Electrochemical Laboratory. Instruction / Radiometer Analytical. – 2009. – 126 p.
15. *LECO DH603.* Manual / LECO Corporation. – 2019.
16. *Fedoroff B. T. and Sheffield O. E.* Encyclopedia of Explosives and Related Items. T. 3. US Army Research and Development Command // *Warheads, Energetics and Combat Support Center.* – 1966. – P. 485–486.
17. *Ballistic impacts with bullet splash – load history estimation for 308 bullets vs. hard steel targets* / R. Andreotti, A. Casaroli, I. Colamartino, M. Quercia, M. V. Boniardi, and F. Berto // *Materials.* – 2023. – **16**, № 11. – Article number 3990. <https://doi.org/10.3390/ma16113990>
18. *Ofsthun M.* When fatigue quality enhancers do not enhance fatigue quality // *Int. J. of Fatigue.* – 2003. – **25**, Is. 9–11. – P. 1223–1228. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00122-1)
19. *Дерев'яничук А. Й., Шелест М. Б.* Артилерійське озброєння і боєприпаси: навч. посіб. – Суми: СумДУ, 2010. – 416 с.
20. *A fragments mass distribution scaling relations for fragmenting shells with variable thickness subjected to internal explosive loading* / Z. Zhang, F. Huang, Y. Cao, and C. Yan // *Int. J. of Impact Eng.* – 2018. – **120**. – P. 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.05.013>

Одержано 05.08.2024