

УДК 535.3:620.179.17

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ ТА ГАРТУВАННЯ СТАЛІ 60С2А НА ЇЇ ОБ'ЄМНУ ПОШКОДЖЕНІСТЬ МЕТОДАМИ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, І. М. ДМИТРАХ, Є. П. ПОЧАПСЬКИЙ,
О. М. МОКРИЙ, А. М. СИРОТЮК, Б. П. КЛИМ, Ю. І. КАНЮК,
І. М. РОМАНИШИН, П. П. ВЕЛИКИЙ, П. М. ДОЛІШНИЙ

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

Проаналізовано вплив поверхневої обробки та гартування циліндричних виробів, виготовлених із середньовуглецевої сталі 60С2А, на зародження та розвиток у них об'ємної пошкодженості. Застосовано три методи акустичного контролю: акустичну та магнетопружну акустичну емісію, а також ультразвуковий поверхневими хвилями. Встановлено задовільну їх кореляцію і найкраще співвідношення ефективності/собівартості під час виконання робіт.

Ключові слова: середньовуглецева сталь, об'ємна пошкодженість, акустична емісія, магнетопружна акустична емісія, ультразвуковий метод поверхневими хвилями.

The effect of mechanical and thermal treatment of cylindrical products made of medium-carbon steel 60C2A on the nucleation and development of volumetric damage in them is considered. Three types of acoustic control methods were used: acoustic emission, magnetoelastic acoustic emission, and ultrasonic surface waves, which controlled the dynamics of its nucleation and development. Research results have shown that these methods can provide a satisfactory correlation between them and have the best efficiency/cost ratio.

Keywords: medium carbon steel, volumetric damage, acoustic emission, magnetoelastic acoustic emission, ultrasonic surface waves method.

Вступ. У технологічному ланцюгу виготовлення–транспортування–експлуатація виробів і обладнання часто виникають ситуації, які спричиняють неякісне оброблення або пошкодження їх поверхонь. Це особливо небезпечно за подальшої термообробки матеріалу, коли вони стають додатковими концентраторами напружень [1–3], а отже, і місцями непередбачуваного зародження і розвитку руйнування [4–6]. Водночас в окремих випадках поверхнєве оброблення матеріалів пластичним деформуванням корисне [7–10], а інколи навіть спеціально наносять концентратори напружень [10–12], щоб досягнути необхідних функціональних характеристик виробу [10, 13–16].

Мета дослідження – оцінити вплив поверхневої обробки та гартування феромагнетних циліндричних виробів на об'ємну пошкодженість матеріалу, що важливо для побудови методик їх технічного діагностування акустичними методами неруйнівного контролю (НК).

Об'єкт досліджень. Використовували циліндричні зразки (рис. 1), виготовлені зі сталі 60С2А. Зовнішній діаметр циліндрів 60 mm, внутрішній 40 mm, довжина 200 mm. Їх зовнішню поверхню піддавали чотирьом видам механічної обробки. Зокрема, першу групу (1) – дробиноструменевій (рис. 1а) з такими параметрами: діаметр кварцового зерна не більше 4 mm, швидкість вильоту часток на виході зі сопла 100 m/s, а обертання циліндра навколо осі 38 mm/s.

Контактна особа: В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, e-mail: skalsky.v@gmail.com

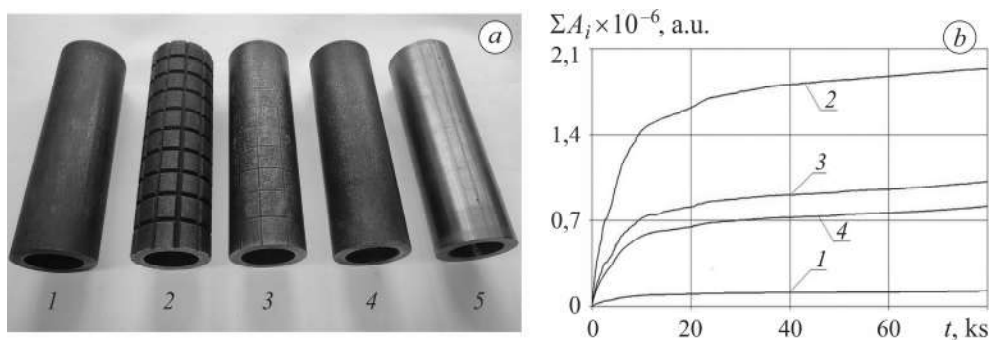


Рис. 1. Загальний вигляд зразків різних груп (а) та типова часова залежність (b) суми амплітуд сигналів АЕ після термообробки (нумерація кривих відповідає номерам груп): 1 – зразок після дробноструменевої обробки поверхні; 2, 3 – зразки з сіткою рівчаків, нанесених, відповідно, токарним різцем та високочастотним механічним проковуванням; 4 – гартований без поверхневої обробки; 5 – зразок з матеріалу у стані постачання.

Fig. 1. A general view of samples of different groups (a) and time dependence (b) of AE signals amplitude sums after thermal treatment (the numbering of the curves corresponds to the group numbers): 1 – sample with shot-blast treatment of the surface; 2, 3 – samples with a net of grooves made by a turning tool and high-frequency mechanical forging, respectively; 4 – quenched sample without surface treatment; 5 – sample made of material in as-received state.

Другу групу (2) обробляли, наносячи рівчаки вздовж і поперек твірної токарним різцем з утворенням їх сітки з кроком 20,5 mm (рис. 1a). Рівчаки глибиною 2,1 mm мали клиноподібну форму: ширина на поверхні металу 4,15 mm, а радіус заокруглення вершини – приблизно 0,3 mm. Поперечні рівчаки наносили за швидкості обертання зразків 783 mm/s і подачі різця 0,15 mm/rot, а поздовжніх – за швидкості нарізання 2 mm/s і обертання фрези 110 rot/min.

Конфігурація сітки рівчаків третьої групи (3) зразків аналогічна, але їх наносили з допомогою високочастотного механічного проковування, що дало можливість заокруглити поверхню її дна радіусом 1,8 mm і глибиною 0,3 mm (рис. 1a). Ширина на поверхні металу зразка 2 mm. Режимі нанесення рівчаків: швидкість переміщення бойка 25 mm/s, амплітуда його коливання 14 μ m з частотою 26 kHz.

Поверхня четвертої (4) групи зразків – без додаткової обробки (рис. 1a). Зразки 1–4 груп гартували від температури 820°C у воді. П'яту групу (5) виготовили з металу у стані постачання.

Методика випроб. Застосовували три методи НК: акустичної емісії (АЕ) [17, 18], магнетопружної акустичної емісії (МАЕ) [19, 20] і ультразвуковий поверхневими хвилями (ПАХ) [8, 21].

На рис. 1b наведено результати АЕ контролю динаміки мікро- та макротріщиноутворення в об'ємі матеріалу [17, 22] відразу після гартування. Відбирали сигнали первинним п'єзоперетворювачем у смузі частот 200... 600 kHz. Для їх опрацювання застосовували акустико-емісійну систему SKOP-8M з такими режимами роботи: тривалість вибірки 0,5 ms; період дискретизації 0,5 μ s; фільтр низьких частот 600 kHz; фільтр високих 200 kHz; поріг дискримінації 28%; коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача 35 dB; коефіцієнт підсилення основного підсилювача 8 dB.

На графіках можна виокремити дві характерні ділянки. Перша розпочинається з моменту початку експерименту і завершується приблизно через 25 ks. Тут швидкість наростання суми амплітуд сигналів найбільша і складає від 87% (зразки групи 3) до майже 100% (зразки групи 4) від загальної суми, що фіксували

впродовж 86,4 ks експерименту. Найбільш схильні до тріщиноутворення гартовані зразки після дробиноструменевої обробки зовнішньої поверхні (група 1), а найменш – з нарізаною різцем сіткою ривчаків (група 2). Порівняно з другою групою, зразки групи 3 генерують майже удвічі менші суми амплітуд, які дещо більші, ніж ті, що генерують необроблені зразки групи 4.

За спектральним аналізом сигналів АЕ, застосовуючи k -критерій [23], визначали механізми їх генерування. Для цього використали хвильові відображення сигналів у довільному часовому інтервалі та за допомогою вейвлет-перетворення отримували необхідні дані для розрахунку числових значень k -критерію (рис. 2 і 3). Наприклад, для зразків групи 1 у відповідні моменти часу $k_1 = 0,24$; $k_2 = 0,28$; $k_3 = 0,23$ (рис. 2), що свідчить про крихке мікроруйнування в об'ємі матеріалу.

Для зразків групи 4 $k_1 = 0,44$; $k_2 = 0,79$; $k_3 = 0,53$ (рис. 3), що також свідчить, про крихке мікроруйнування в об'ємі матеріалу, бо в обох випадках $k_i > 0,2$ [23]. Аналогічні значення k -критерію отримали і для АЕ сигналів інших двох груп зразків, оскільки гартування матеріалу сприяє крихкому руйнуванню, яке розпочинається з мікророзтріскування по всьому об'єму. Але цікавим є те, що після дробиноструменевої обробки поверхні перед гартуванням (рис. 1b, крива 1) його об'ємна пошкодженість приблизно у півтора порядки менша, ніж після нанесення різцем сітки ривчаків (крива 2) [17, 24].

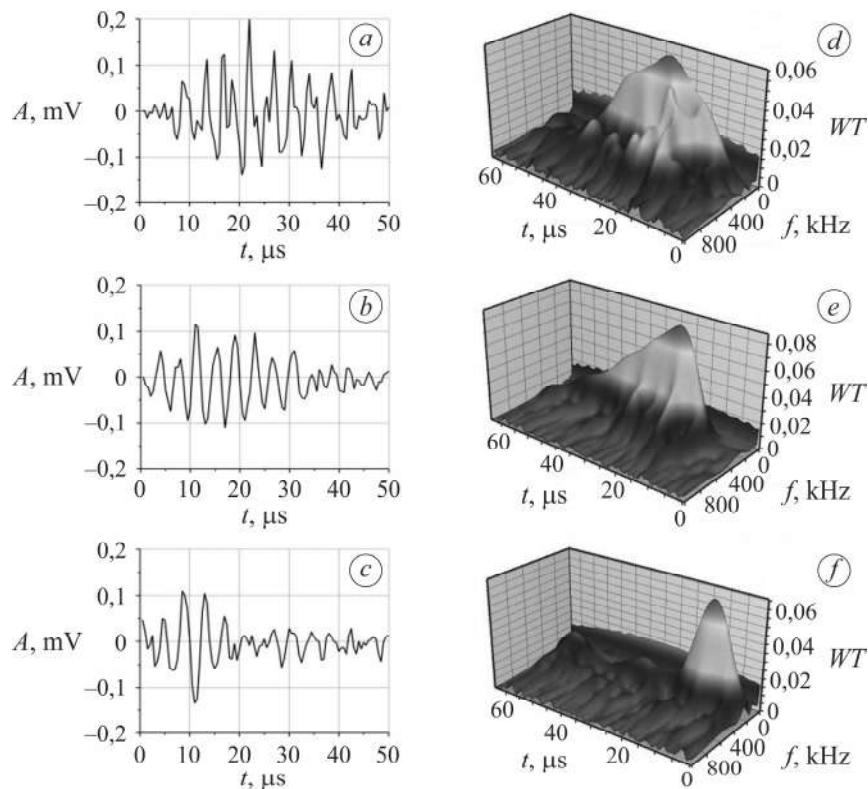


Рис. 2. Характерні сигнали АЕ, що супроводжують мікротріщиноутворення у зразках групи 1 (a–c) та їх вейвлет-перетворення (d–f):

a, d – у момент часу $t_1 = 0,023$ ks; b, e – $t_2 = 13,6$ ks; c, f – $t_3 = 85,13$ ks.

Fig. 2. Characteristic AE signals accompanying the formation of microcracks in specimens of group 1 (a–c) and their wavelet transformations (d–f):

a, d – at time $t_1 = 0.023$ ks; b, e – $t_2 = 13.6$ ks; c, f – $t_3 = 85.13$ ks.

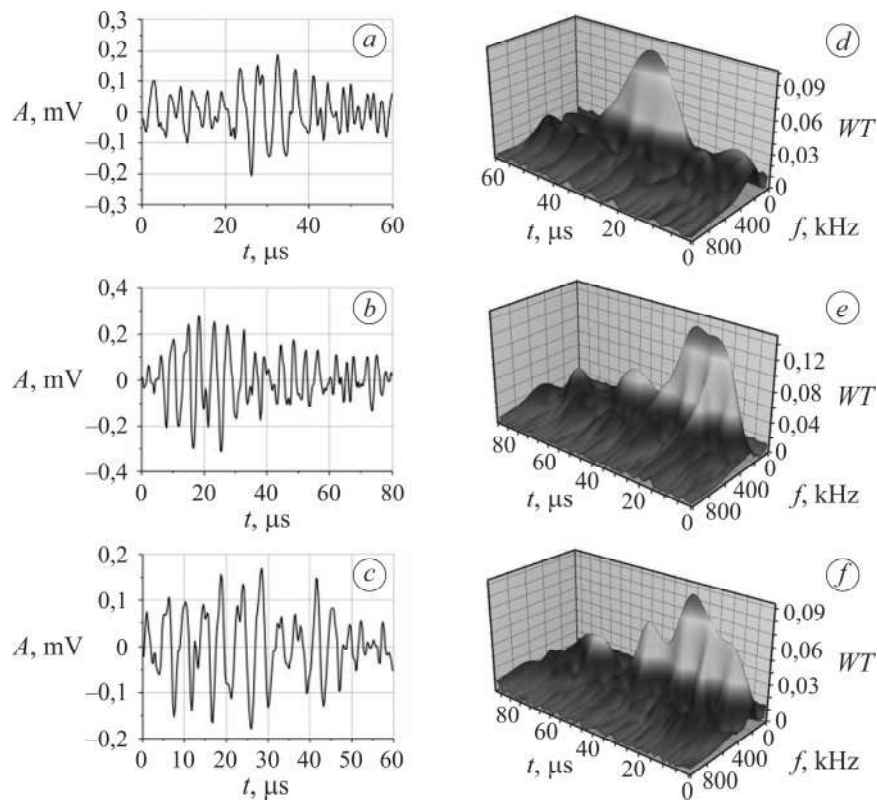


Рис. 3. Характерні сигнали АЕ, що супроводжують мікротріщиноутворення у зразках групи 4 (a–c) та їх вейвлет-перетворення (d–f):
a, d – у момент часу $t_1 = 0,23$ ks; b, e – $t_2 = 14,93$ ks; c, f – $t_3 = 80,72$ ks.

Fig. 3. Typical AE signals accompanying the formation of microcracks in specimens of group 4 (a–c) and their wavelet transformations (d–f):
a, d – at time $t_1 = 0.23$ ks; b, e – $t_2 = 14.93$ ks; c, f – $t_3 = 80.72$ ks.

Застосування МАЕ. Відомо [19], що через пружні напруження, пластичні деформації, об'ємну пошкодженість матеріалу, а також збільшення вмісту вуглецю у сплавах заліза знижується активність МАЕ, а відпал та водень, навпаки, сприяють її зростанню [25, 26]. Тому важливо встановити особливості МАЕ під час квазістатичного перемагнення у всіх групах зразків зі заздалегідь обробленою поверхнею після гартування, а також виготовлених з матеріалу у вихідному стані.

Перемагнечували у соленоїді зі 2690 витками мідного дроту діаметром 0,88 mm, укладеними у кілька шарів. Струм (синусоїда) перемагнення 1,1 А створював у зразках індукцію магнетного поля $B_{\max} = 0,395$ Т. Внутрішній діаметр соленоїда 76 mm, а його довжина 164 mm. Перед початком експериментів числово розраховували розподіл магнетного поля у циліндрі (рис. 4). Виявили, що промагнення відбувається наскрізь як стінки циліндра, так і його дна. Після відповідних обчислень приступали до експериментальних [19] випроб (рис. 5).

Найменший показник суми амплітуд сигналів МАЕ мали зразки групи 4, що свідчить про їх найбільшу об'ємну пошкодженість (майже у 8 разів) порівняно з негатованими зразками у стані постачання (група 5). Зразки груп 1–3 мало відрізнялися за МАЕ активністю, тобто їхня об'ємна пошкодженість різнилась від зразків групи 5 приблизно на 10...15%. Після термообробки зразків груп 1–3 та 5 їхні залежності $\sum A_i(B)$ практично збігались з такими для групи 4.

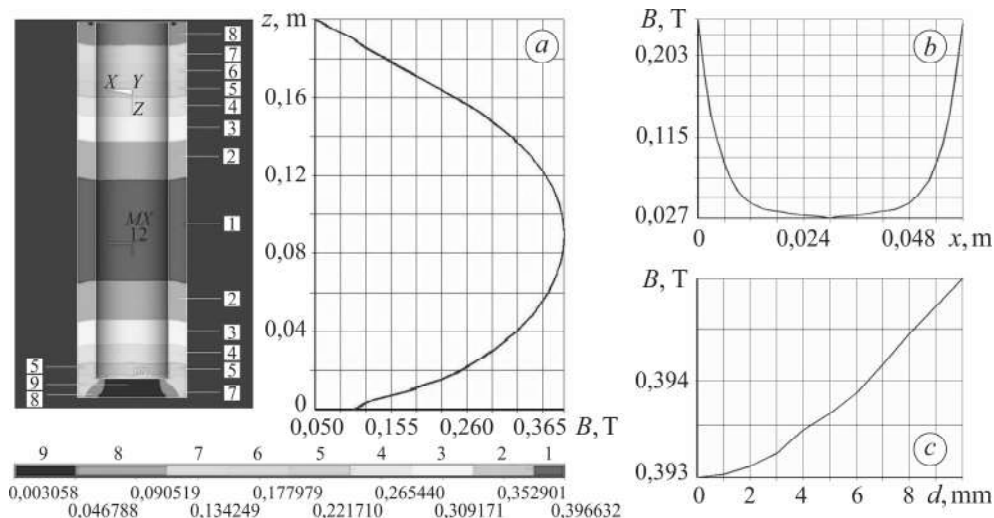


Рис. 4. Розподіл індукції магнетного поля B уздовж зразка z у соленоїді (а), на дні отвору діаметром x (b) та за товщиною d стінки (с) (0 – точка на внутрішній поверхні циліндра).

Fig. 4. Distribution of induction of the magnetic field B along the sample z in the solenoid (a), at the bottom of the hole with diameter x (b) and along the thickness d of the wall (c) (0 is a point on the inner surface of the cylinder).

Порівнюючи результати АЕ та МАЕ контролю, можна зробити висновок, що будь-яка механічна обробка поверхні циліндричного зразка перед гартуванням збільшує об'ємну пошкодженість під впливом механічних напружень. Особливо схильними до цього виявились зразки з нанесеною високочастотним механічним проковуванням сіткою рівчаків (група 3, рис. 5).

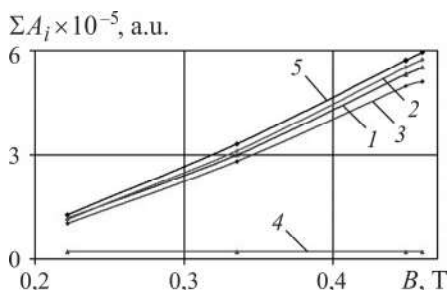


Рис. 5. Залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від індукції магнетного поля (зразки груп 1–3 та 5 не гартовані, а лише механічно оброблені, 4 – гартовані).

Fig. 5. Dependence of the sum of the amplitudes of the MAE signals on the induction of the magnetic field in the specimens (specimens of groups 1–3 and 5 are unquenched, with mechanical treated surface).

Щоб оцінити зміну стану зразків під дією різних технологічних чинників, визначали їх акустичні властивості з допомогою ПАХ. Луно-імпульсним методом встановлювали швидкості поширення ПАХ, а також їх загасання. Будували залежність амплітуди акустичної хвилі від шляху її проходження. Застосовували клиновидні п'єзоелектричні перетворювачі, в яких поздовжня об'ємна хвиля перетворювалася в поверхневу. Для вимірів виготовили перетворювачі із кривизною контактної поверхні, яка відповідала поверхні зразків. Зміну швидкості ПАХ визначали перетворювачами з фіксованою базою вимірювань зі жорстко з'єднаними збуджувальною та приймальною частинами. Швидкості хвилі вздовж осі циліндра оцінювали перетворювачем із базою 100 mm, а у напрямку, перпендикулярному до осі зразка, з базою 47 mm. Заникання встановлювали окремими перетворювачами для збудження і приймання ПАХ, які переміщали один віднос-

но одного. Тривалість радіоімпульсу збудження становила декілька мікросекунд, а частота заповнення 3 МГц. Зміну швидкості встановлювали відносно зразка з матеріалу у стані постачання (група 5) (див. таблицю і рис. 6). Виявили, що гартування знижує швидкість поширення ПАХ, що спричинено мікротріщинами, а також зміною фазового складу металу.

Зміна швидкості ПАХ у зразках після різних видів оброблення

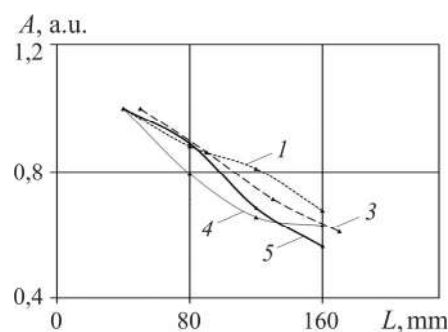
Вид обробки	Група зразків		
	1	3	4
Механічна	-0,4* / -0,4**	-0,25* / -0,15**	–
Термічна	-2,5* / -2,4**	-2,5* / -2,5**	-2,4* / -2,4**

Примітка: * хвиля поширювалась паралельно осі зразка; ** перпендикулярно.

Амплітуда сигналу з ростом бази вимірювань для чотирьох груп (1, 3–5) зразків після поверхневої обробки та гартування зменшується (рис. 6). Зміну амплітуди визначали у напрямку, паралельному до осі зразка, і встановили, що за заниканням ПАХ не вдається ефективно її оцінити. У зразках групи 2 сигнал розсіювався на рівчаках і приймач його не реєстрував, тому вимірювання не дали результату. В усіх групах зразків швидкість ПАХ зменшується. Зокрема, після дробиноструменевої обробки – на 0,4%, після високочастотного механічного проковування – на 0,15...0,25%, а після гартування – на 2,4%.

Рис. 6. Залежність амплітуди ПАХ від пройденої відстані вздовж осі зразків груп 1, 3–5.

Fig. 6. Dependence of SAW amplitude on the passage distance along the axis for specimens of types 1, 3–5.



Після дробиноструменевої обробки та високочастотного механічного проковування швидкість ПАХ від напрямку поширення не залежить. Ці технологічні операції призводять до пластичної деформації металу в тонкому поверхневому шарі, який становить кілька десятих міліметра [27, 28]. Тому в ньому зростають густина дислокацій та кількість дефектів [29, 30], через що зменшуються пружні модулі, що є причиною падіння швидкості ПАХ. Цікавим є також і комплексне застосування вказаних методів під час корозивного і водневого розтріскування сталі 60C2A.

ВИСНОВКИ

Акустичні методи неруйнівного контролю ефективні для оцінювання ступеня пошкодженості виробів на різних стадіях їх виробництва та експлуатації. Наприклад, за необхідності отримати вихідну інформацію перед гартуванням чи іншими видами термообробки доцільно застосовувати МАЕ, а динаміку тріщиноутворення найефективніше контролювати за параметрами АЕ. Пластична деформація металу в тонкому поверхневому шарі дещо змінює параметри ПАХ. Застосовані акустичні методики НК чутливі до зміни об'ємної пошкодженості сталі, особливо на ранніх стадіях зародження тріщиноутворення.

Роботу підтримала Національна академія наук України в межах програми “Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень” на 2023–2024 роки (Договір № 3.2/23-П).

1. Hauserova D., Dlouhy J., and Kover M. Pearlitic lamellae spheroidisation during austenitization and subsequent temperature hold // Archives of Metallurgy and Materials. – 2017. – **62**, № 1. – P. 201–204. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0028>
2. 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>
3. Computational modeling of explosive-filled cylinders / Jr. C. E. Anderson, W. W. Predebon, and R. R. Karpp // Int. J. of Eng. Sci. – 1985. – **23**, № 12. – P. 1317–1330. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(85\)90110-7](https://doi.org/10.1016/0020-7225(85)90110-7)
4. 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**, № 12. – P. 1578–1586. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.002>
5. 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>
6. Grisaro H. Y., Benamou D., and Dancygier A. N. Investigation of blast and fragmentation loading characteristics – Field tests // Eng. Struct. – 2018. – **167**. – P. 363–375. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.013>
7. Effect of cold deformation in quench and tempered medium-carbon steel bars microstructure / V. H. Aranda, F. D. Carazo, L. N. García, D. J. Celentano, and A. J. Tolley // Mater. Sci. and Techn. (United Kingdom). – 2022. – **38**, № 4. – P. 230–236. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037057>
8. Estimation of characteristics of nanocrystalline layer using the surface acoustic waves / V. R. Skalskyi, O. M. Mokryi, O. I. Zvirko, V. I. Kyrlyiv, I. M. Romanyshyn, and O. V. Maksymiv // Materials Science. – 2023. – **59**, № 2. – P. 180–185. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00760-3>
9. Magnetostrictive strain monitoring in Non-Oriented Si-Fe steels using a SAW resonator sensor / O. Marbough, A. Mazzamurro, O. Bou Matar, Y. Dusch, W. Bekir, D. Laloy, K. Ettahir, A. Tounzi, A. Benabou, and A. Talbi // J. of Magnetism and Magnetic Mater. – 2024. – **589**. – Article number 171619. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171619>
10. Villano D. and Galliccia F. Innovative technologies for controlled fragmentation warheads // J. of Appl. Mech., Trans. ASME. – 2013. – **80**, № 3. – Article number 031704. <https://doi.org/10.1115/1.4023341>
11. Explosive fragmentation of additively manufactured stainless steel / M. Callahan, D. Sun, M. A. Linne, A. S. Wu, G. H. Campbell, B. Friedman, J. Rodriguez, S. Burke, A. Lodes, K. Hansen, K. Mickelson, R. Wraith, J. J. Nicolino, and H.-S. Park // J. of Appl. Phys. – 2023. – **134**, № 15. – Article number 155105. <https://doi.org/10.1063/5.0170223>
12. 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.
13. 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**, № 3. – Article number 110034. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.110034>
14. 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. <https://doi.org/10.1201/9781003418146-65>
15. Ofsthun M. When fatigue quality enhancers do not enhance fatigue quality // Int. J. of Fatigue. – 2003. – **25**, № 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)
16. 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**, № 2. – P. 246–255. <https://doi.org/10.1134/S0010508221020143>

17. Nazarchuk Z., Skalskyi V., and Serhiyenko O. Acoustic Emission. Methodology and Application. – Cham: Springer Int. Publishing AG, 2017. – 284 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-49350-3>
18. Lenzen M., Kraus M., and Merklein M. Characterization and modelling of sheet material with graded strength for more accurate finite element analysis // Key Eng. Mat. – 2022. – **926**. – P. 1923–1930. <https://doi.org/10.4028/p-vqmjf9>
19. Prediction of remaining fatigue life of metal specimens using data-driven method based on acoustic emission signal / J. Li, X. Cao, R. Chen, C. Zhao, Y. Li, and X. Huang // Appl. Acoustics. – 2023. – **211**. – Article number 109571.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109571>
20. Effect of operational factors on magnetoacoustic emission of low-carbon steels / V. Skalsky, Z. Nazarchuk, O. Stankevych, B. Klym, and T. Selivonchyk // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – **199**. – Article number 104744. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104744>
21. Theoretical model of magnetoacoustic emission considering the microstructure of ferromagnetic material / H. Zhang, J. Jiao, B. Wu, and C. He // Measurement Sci. and Techn. – 2023. – **34**, № 12. – Article number 125033. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acf516>
22. Combined longitudinal and surface acoustic wave analysis for determining small filling levels in curved steel containers / M. Metzenmacher, A. Beugholt, D. Geier, and T. Becker // Sensors. – 2022. – **22**, № 9. – Article number 3476. <https://doi.org/10.3390/s22093476>
23. Influence of surface integrity on the fatigue behaviour of a hot-forged and shot-peened C70 steel component / B. Gerin, E. Pessard, F. Morel, and C. Verdu // Mater. Sci. and Eng.: A. – 2017. – **686**. – P. 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.041>
24. Nazarchuk Z. T., Skalskyi V. R., and Stankevych O. M. A method for the identification of the types of macrofracture of structural materials by the parameters of the wavelet transform of acoustic-emission signals // Materials Science. – 2014. – **49**, № 6. – P. 841–848.
<https://doi.org/10.1007/s11003-014-9682-y>
25. Influence of occluded hydrogen on magnetoacoustic emission of low-carbon steels / V. Skalskyi, Z. Nazarchuk, O. Stankevych, and B. Klym // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2023. – **48**, № 15. – P. 6146–6156. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.139>
26. Residual stress distribution monitoring and rehabilitation in ferromagnetic steel rods / K. Liang, S. Angelopoulos, A. Ktena, X. Bi, and E. Hristoforou // Sensors. – 2022. – **22**, № 4. – Article number 1491. <https://doi.org/10.3390/s22041491>
27. The use of surface acoustic waves to evaluate of the near-surface layers of metal processed shot peening / V. Skalskyi, M. Student, O. Mokryy, W. Dudda, Y. Kharchenko, H. Chumalo, and V. Hvozdetyskiy // Diagnostyka. – 2021. – **22**, № 3. – P. 51–57.
<https://doi.org/10.29354/DIAG/141232>
28. Depth profiling of residual stress distribution in surface treated metallic structures using nonlinear ultrasonics / S. Sampath, H. Liu, Z. W. Tham, Y. F. Chen, and L. Zhang // Ultrasonics. – 2024. – **137**. – Article number 107186. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.107186>
29. Kapoor R. Severe Plastic Deformation of Materials // Materials Under Extreme Conditions: Recent Trends and Future Prospects. – Elsevier, 2017. – P. 717–754.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801300-7.00020-6>
30. The synergetic effects of shot peening and laser-shot peening on the microstructural evolution and fatigue performance of a medium carbon steel / Y. Zhang, K. Zhang, Z. Hu, T. Chen, L. Susmel, and B. Wei // Int. J. of Fatigue. – 2023. – **166**. – Article number 107246. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107246>

Одержано 05.10.2023