

## Дослідження структурної неоднорідності високоміцних листових матеріалів

**В.П. Швець, П.О. Булах, О.М. Масло**

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

***Анотація:** Робота присвячена актуальній науково-практичній задачі застосування методів досліджень процесів накопичення пошкоджень в металах в умовах активної експлуатації конструкцій та вибору необхідних параметрів, що характеризують ступінь деградації матеріалу, для оцінки несівної здатності конструктивних елементів із врахуванням їх поточної пошкоджуваності.*

*Описано апробацію методу експрес – контролю для діагностики поточного стану поверхні великої площі за характеристиками розсіяння значень твердості матеріалів. Показано, що отримати кількісну характеристику стану металу можна за допомогою методу LM – твердості, згідно з яким в якості інформаційних ознак стану металу приймаються параметри розсіювання значень твердості. Експериментальні результати отримано при дослідженні високоміцних матеріалів типу Artox 500T, Hardox 450 тощо. Отримані результати дозволили підвищити якість неруйнівного контролю металу за характеристиками розсіяння значень твердості матеріалів і виконати ряд практичних робіт щодо оцінки стану реальних заготовок металу, що використовуються при створенні відповідальних технічних виробів чи елементів конструкцій.*

***Ключові слова:** твердість; пошкоджуваність; структурна неоднорідність; метод LM-твердості; неруйнівний контроль.*

**Вступ.** Елементи конструкцій при експлуатації сприймають складний комплекс механічних, температурних й інших видів зовнішніх і внутрішніх впливів на різних масштабних рівнях, що викликає або стимулює процеси накопичення розсіяних пошкоджень різних видів. Актуальним в науковому та практичному планах є задачі, пов’язані з розробкою нових, адаптацією існуючих методів досліджень цих процесів в металах при активній експлуатації конструкцій, вибором необхідних параметрів, що характеризують ступінь деградації цих матеріалів, створенням відповідних алгоритмів для розрахунків несівної здатності конструктивних елементів із врахуванням поточної пошкоджуваності матеріалів та їх неоднорідності.

Для контролю стану матеріалу деталей та елементів конструкцій найчастіше використовують численні методи: оптичні, рентгенівську та ультразвукову дефектоскопію, метод акустичної емісії тощо, переважна більшість яких потребує залучення лабораторного обладнання або забезпечує лише якісну оцінку стану. Разом з цим, методи, пов’язані з індентуванням та визначенням твердості матеріалу [1]–[5] є достатньо простими, швидкими, чутливими та універсальними методами дослідження механічних властивостей різноманітних матеріалів, які не потребують виготовлення спеціальних зразків та еталонів. Отримати кількісну характеристику стану металу можна за допомогою методу LM – твердості [6]–[8], згідно з яким в якості інформаційних ознак стану металу приймаються не абсолютні значення будь якої механічної характеристики, а параметри розсіювання її значень при масових вимірах. Оскільки сама твердість слабо корелює із пошкодженням матеріалу, оцінка його стану базується на масових вимірах твердості, ступінь розсіяння якої суттєво залежить від рівня неоднорідності структури і, як наслідок, від рівня його пошкоженості: Чим більша неоднорідність структури, тим більшим є розсіяння вимірюваних характеристик твердості.

**Матеріали і методи.** Наведені нижче експериментальні результати отримано при дослідженні неоднорідності та накопичення пошкоджень в високоміцних матеріалах типу Artox 500T, Hardox 450 тощо. Ступінь розсіяння вимірюваних значень твердості характеризується статистичними параметрами розподілу Вейбула, який описує це розсіяння, а саме коефіцієнтом гомогенності  $m$ . Його можна визначити за формулою Гумбеля:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 S(\lg H)} \quad (1)$$

де величину  $d(n)$  визначають в залежності від числа  $n$  вимірів, а величина  $S(\lg H) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2}$ , де  $\overline{\lg H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg H_i$  - середнє значення логарифмів твердості.

Більшим значенням коефіцієнта гомогенності  $m$  відповідає більш однорідний та менш пошкоджений матеріал. Вимірювання неоднорідності зразків досліджуваних матеріалів у вигляді пластин з розмірами 250мм x 150мм x 10мм проводились на 16 різних ділянках, рівномірно розподілених по поверхні (рис. 1, а). Згідно стандарту [9] визначали ступінь неоднорідності матеріалу шляхом визначення характеристик твердості за Роквелом. Твердість вимірювали в кожній із 16 визначених ділянок площею з поперечним перерізом близько 15 мм як середнє арифметичне за 30 вимірами. За цими ж даними обчислювали значення коефіцієнта гомогенності  $m$ . Слід зазначити, що виміри твердості в кожній із зон вимірювання коефіцієнта гомогенності проводили таким чином, щоб виключити вплив попередніх точок вимірювання твердості на поточний результат [10].

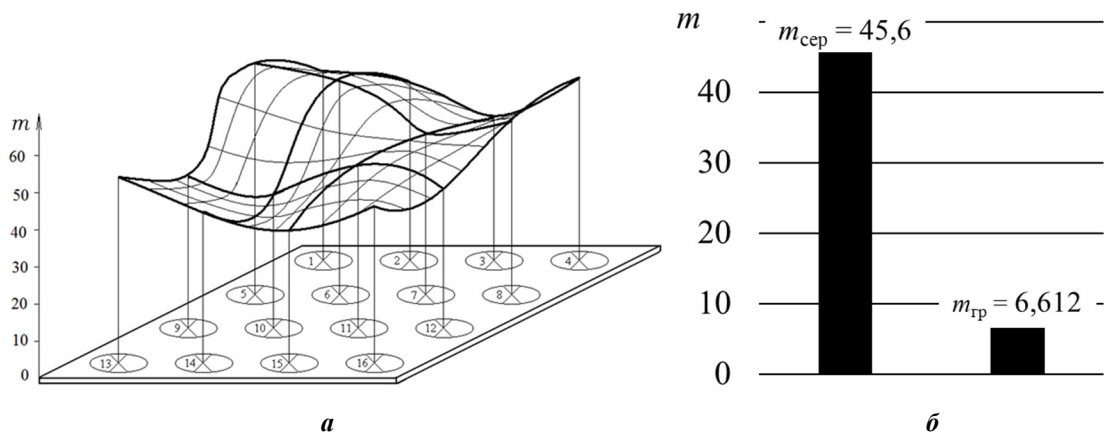


Рис. 1. Розподіл коефіцієнтів гомогенності  $m$  по поверхні зразка із сталі Hardox 450 (а) та граничне значення коефіцієнту гомогенності  $m_{rp}$  при руйнуванні (б).

**Результати та обговорення.** Дослідження показали, що середнє значення коефіцієнта гомогенності по всій дослідженій поверхні становить  $m_{сep} = 45,6$ . Розкид значень коефіцієнта гомогенності по всій пластині не перевищує 20% від середнього значення. Відмінності в значеннях вказують на деяку анізотропію властивостей матеріалу пов'язану з впливом механічної обробки, вихідною структурною неоднорідністю матеріалу тощо.

Разом з тим, виявлені відхилення від середнього значення неоднорідності дають підстави вважати, що у дослідженому елементі відсутні значні дефекти структури, які могли б викликати порушення його несівної здатності в ході експлуатації. Дослідження [2], [6]–[8] показали, що граничний коефіцієнт гомогенності матеріалу при руйнуванні значно знижується порівняно з вихідним станом і при руйнуванні матеріалу може досягати значень 5...10 (рис. 1, б). Також вказаний коефіцієнт значно знижується (близько 30% і більше) при досягненні матеріалом межі текучості, що відображає значні зміни структури, пов'язані з виникненням незворотніх деформацій. Таким чином, відсутність на дослідженій поверхні зразка (рис. 1, а) подібних низьких значень коефіцієнта гомогенності дозволяє стверджувати, що поверхневий шар дослідженого матеріалу є достатньою мірою однорідний та не містить критичних пошкоджень, які можуть значно вплинути на експлуатаційні характеристики елементу конструкції.

## Висновки

Експериментально обґрунтовано спосіб експрес – контролю стану поверхні виробу чи елементу конструкції за найбільш показовим параметром його структури. Одержані результати дозволили підвищити якість неруйнівного контролю металу за характеристиками розсіяння значень твердості матеріалів і виконати ряд робіт щодо оцінки стану реальних заготовок металу, які використовуються при створенні відповідальних технічних виробів та елементів

конструкцій. Досліджено стан поверхні листового зразка та отримано характеристики неоднорідності його поверхні шляхом визначення коефіцієнта гомогенності структури металу за параметрами розсіювання характеристик твердості при масових вимірах. Встановлено, що неоднорідність поверхні листового зразка в оцінці коефіцієнтом гомогенності не перевищує 20%. Це дозволяє на підставі отриманих характеристик розсіювання значень твердості, які є чутливими до трансформації структури, стверджувати про достатню однорідність всієї досліджуваної поверхні.

### Список літератури:

1. F. Bjørheim, D. G. Pavlou, and S. C. Siriwardane, “Hardness measurements as a technique for measuring accumulated fatigue damage”, *Int. J. Struct. Integr.*, vol. 13 no. 4, pp. 699-716, Jun. 2022, doi:10.1108/IJSI-04-2022-0061
2. M. R. Muzyka, V. P. Shvets and A. V. Boiko, “Procedure and instruments for the material damage assessment by the LM-Hardness method on the in-service scratching of structure element surfaces”, *Strength Mater.*, vol. 52, pp. 432–439, Aug. 2020.
3. M. Saleh et al., “Relationship between damage and hardness profiles in ion irradiated SS316 using nanoindentation – Experiments and modelling”, *Int. J. Plast.*, vol. 86, pp. 151-169, Nov. 2016, doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.08.006
4. B. R. Cardoso, C. F. T. Matt, H. C. Furtado and L. H. de Almeida, “Creep damage evaluation in high-pressure rotor based on hardness measurement”, *JMEP*, vol. 24, pp. 2784–2791, May 2015.
5. H. C. Furtado, L. H. de Almeida, J. Dille and I. Le May, “Correlation between hardness measurements and remaining life prediction for 2.25Cr-1Mo steel used in power plants”, *JMEP*, vol. 19, pp. 558–561, Jul. 2010.
6. M. R. Muzyka and V. P. Lamashevskii. “Assessment of the service reliability of elastoplastic sheet materials from hardness parameters”, *Strength Mater.*, vol. 49, pp. 472–478, Oct. 2017.
7. O. M. Maslo, P. O. Bulakh, V. P. Shvets and A. A. Kotlyarenko, “Application of the LM-Hardness method to assess the current material state of structural elements”, *Strength Mater.*, vol. 54, pp. 30–640, Nov. 2022.
8. F. F. Giginyak and O. M. Maslo, “A relationship between damage in 10GN2MFA steel and low-cycle strain-controlled loading at different deformation frequencies”, *Strength Mater.*, vol.49, pp. 343–348, Jul. 2017.
9. DSTU 7793. *Metallic Materials. Determination of the level of scattered damages by the LM-Hardness method* [in Ukrainian], Valid since April 1, 2017.
10. Luo Li, T. Khraishi and Yu-Lin Shen “Investigation of the effect of indentation spacing, edge distance and specimen thickness on the measurement of hardness”, *J. Mech. Sci. Technol.*, vol.37, pp. 687–696, Jan. 2023.

## Studies on structural heterogeneity of high-strength sheet materials

V.P. Shvets, P.O. Bulakh, O.M. Maslo

**Abstract:** *The work is devoted to the actual scientific and practical task of applying the methods of researching the processes of damage accumulation in metals under the conditions of active operation of structures and selecting the necessary parameters characterizing the degree of material degradation to assess the load-bearing capacity of structural elements, taking into account their current damage.*

*The approbation of the express control method for diagnosing the current state of the surface of a large area based on the characteristics of the dispersion of material hardness values is described. It is shown that it is possible to obtain a quantitative characteristic of the state of the metal using the LM - hardness method, according to which the parameters of the dispersion of its values during mass measurements of hardness are accepted as informative signs of the state of the metal. Experimental results were obtained during the study of high-strength materials such as Armax 500T, Hardox 450, etc. The obtained results made it possible to improve the quality of non-destructive testing of metal by the characteristics of dispersion of material hardness values and to perform a number of practical works on assessing the condition of real metal blanks used in the creation of responsible technical products or structural elements.*

**Keywords:** *hardness; damageability; structural heterogeneity; LM-hardness method; non-destructive testing.*