

УДК 620.178.15/179.119

Павло Булах, к.т.н.; Олександр Масло, к.т.н.; Володимир Швець, к.т.н.; Віктор Ламашевський, к.т.н.

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

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ РОЗСІЯНИХ ПОШКОДЖЕНЬ В ТОНКОСТІННОМУ ЦИЛІНДРІ В УМОВАХ ДВОВІСНОГО ЦИКЛІЧНОГО РОЗТЯГУ

Анотація. В доповіді приведено результати експериментальних досліджень кінетики накопичення пошкоджень у різних зонах розвитку деформації. Методом ЛМ-твердості оцінювали однорідність металу тонкостінних циліндричних зразків із сталі 10ГН2МФА. Аналіз отриманих даних показав, що в металі зразка спостерігається яскраво виражена закономірність значного збільшення неоднорідності матеріалу при наближенні до зони руйнування.

Ключові слова: пошкоджуваність, циклічне навантаження, гомогенність, твердість, метод ЛМ-твердості.

Pavlo Bulakh, Ph.D.; Oleksandr Maslo, Ph.D.; Volodymyr Shvets, Ph.D.; Victor Lamashevsky, Ph.D.

ASSESSMENT OF DISTRIBUTED DAMAGE IN A THIN-WALLED CYLINDER UNDER BIAXIAL CYCLIC TENSILE CONDITIONS

Abstract. The report presents the results of experimental studies on the kinetics of damage accumulation in different zones of deformation development. The metal homogeneity of thin-walled cylindrical samples made of 10HN2MFA steel was assessed using the LM-hardness method. The data analysis revealed a significant increase in material heterogeneity near the fracture zone in the sample metal.

Keywords: damageability, cyclic loading, homogeneity, hardness, LM-hardness method.

Дослідження основних видів та методів неруйнівної оцінки поточного стану матеріалу дозволяють стверджувати, що одним з перспективних напрямків щодо оцінки стану структури конструкційних матеріалів є використання параметрів пошкоджуваності, що ґрунтуються на статистичній оцінці деякої вибірки значень характеристик механічних властивостей матеріалу. Одним з таких параметрів є гомогенність (однорідність) структури матеріалу, визначення якої покладено в основу методу ЛМ-твердості [1-2]. В якості параметра розсіювання виявилось зручним використовувати коефіцієнт гомогенності матеріалу m у розподілі Вейбулла, який визначається за формулою Гумбеля:

$$m = 0,4343 \times d(n) \times \left[\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де величину $d(n)$ визначають в залежності від кількості n вимірювань, H_i - значення твердості за i -м вимірюванням, $\overline{\lg H}$ - середнє значення логарифма твердості за результатами n вимірювань.

Метод поєднує такі очевидні переваги методів статичної та динамічної твердості, як зручність і простота приладового забезпечення, з достатньо високою чутливістю коефіцієнта гомогенності до багатьох видів трансформації структури і, отже, до ступеня пошкодження матеріалу, що не можуть забезпечити класичні методи твердості. Метод базується на вимірюванні параметрів розсіювання значень твердості при масових випробуваннях та широко використовується як експрес-метод оцінки якості

металу, в тому числі ступеня пошкоджуваності як у вихідному стані, так і набутої в процесі експлуатації конструкцій.

Важливим аспектом прикладного застосування методу LM-твердості для визначення поточної пошкоджуваності поверхневого шару матеріалу зразків або елементів конструкцій є раціональний вибір конфігурації зон масових вимірів твердості. Однією з найважливіших вимог при визначенні твердості є прикладення зусилля при заглибленні індентора в матеріал по нормалі до поверхні в точці вимірювання та збереження цього напрямку впродовж всього часу прикладення зусилля. Ця умова беззаперечно виконується для стандартних зразків матеріалів, які підготовлені до визначення твердості, оскільки такі зразки мають плоскопаралельні грані або циліндричну поверхню, що дозволяє провести визначення твердості згідно з усіма вимогами стандарту. Проте у випадку визначення твердості поверхні зразків або елементів конструкції трубчатої форми, що мають значну залишкову деформацію бічної поверхні внаслідок руйнування, площа, яку можна використати для виміру твердості стандартними твердомірами, може бути обмежена. Головним чином, ці обмеження пов'язані з особливостями апаратної реалізації твердоміра, габаритними розмірами зразка, а також можливістю забезпечення прикладення зусилля індентування по нормалі до поверхні матеріалу, можливістю фіксації досліджуваного фрагмента зразка у штатному затискачі твердоміра тощо. В зв'язку з цим доцільно дослідити за допомогою методу LM-твердості розподіл розсіяних пошкоджень по бічній поверхні зруйнованих трубчатих зразків відносно зони руйнування (рис. 1).

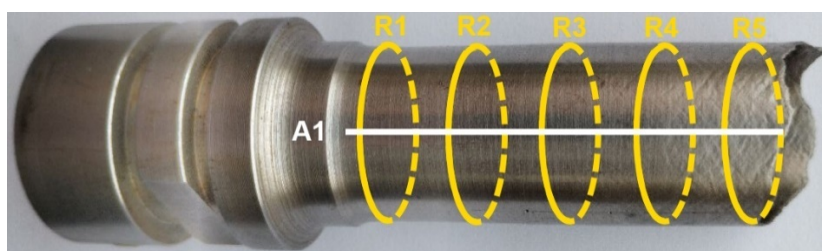


Рисунок 1 – Схема визначення значень коефіцієнта гомогенності на бічній поверхні трубчатого зразка із сталі 10ГН2МФА у поздовжньому (A1) та поперечному (R1-R5) напрямках.

В процесі реалізації серії випробувань трубчатих зразків в умовах одновісного та двовісного навантажень отримано масив експериментальних значень коефіцієнта гомогенності що дозволяє оцінити кінетику накопичення пошкоджень в різних зонах бічної поверхні зруйнованих трубчатих зразків при різних співвідношеннях головних напружень (таблиця 1).

Таблиця 1 – Розподіл значень коефіцієнта гомогенності m , твердості HRB та коефіцієнта варіації v на бічній поверхні трубчатого зразка із сталі 10ГН2МФА, що зазнав руйнування в умовах малоциклової втоми.

Напрямок	m	HRB	v
R1	45,4	101,3	2,44
R2	29,8	101,6	3,77
R3	19,8	99,3	5,58
R4	16,9	96,8	6,34
R5	5,3	93,4	17,99
A1	24,2	100,9	4,58

Для всіх досліджених зразків спостерігається яскраво виражена закономірність значного збільшення неоднорідності матеріалу, яке супроводжується зменшенням коефіцієнта гомогенності, при наближенні до зони руйнування (рис.2).

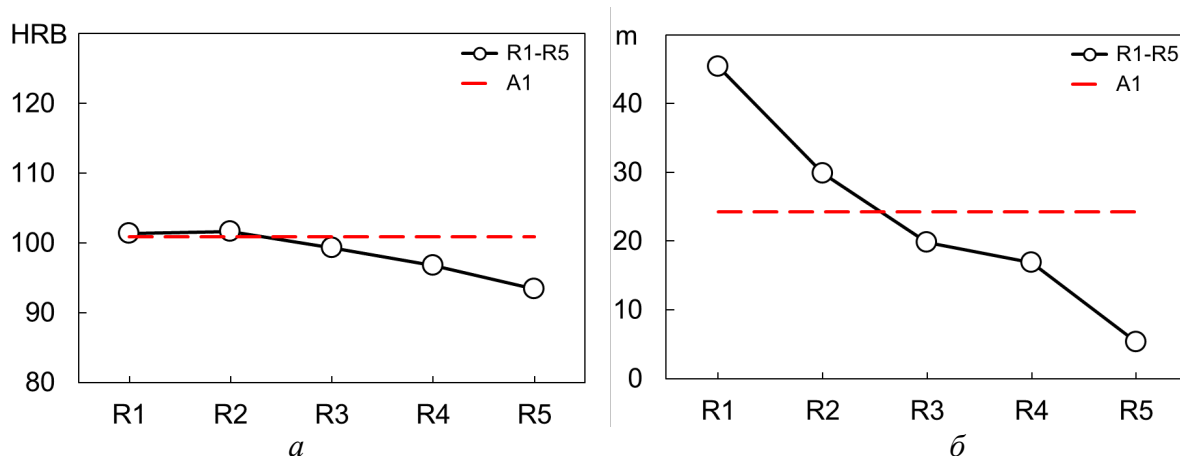


Рисунок 2 – Розподіл значень твердості HRB (*a*) та коефіцієнта гомогенності *m* (*б*) по бічній поверхні трубчатого зразка.

Для всіх досліджених зразків спостерігається яскраво виражена закономірність значного збільшення неоднорідності матеріалу, що супроводжується зменшенням коефіцієнта гомогенності, при наближенні до зони руйнування.

Таким чином, для ділянок бічної поверхні робочої зони зруйнованого зразка, які знаходяться достатньо далеко від області локалізації пластичного деформування при руйнуванні, визначені експериментально значення коефіцієнту гомогенності є такими, що характерні для матеріалу, який зазнав впливу зовнішнього навантаження та має ступінь неоднорідності вищий, ніж вихідний матеріал.

Перелік посилань

1. 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.

2. 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