

УДК 536.71: 539.42: 620.178.3: 669.017

В. Г. Байло, к. т. н., доц.;

В. М. Михалевич, д. т. н., проф.;

Н. О. Петраковська, студ.

## ЕРГОДИНАМІЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОЇ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

Визначення розрахунковим шляхом ресурсу реальних конструкцій, довговічність яких залежить від великого числа факторів, є дуже складною задачею, і існує необхідність у розробці методів оцінки накопиченого ушкодження. Останнє дозволить прогнозувати залишкову працездатність контрольованих виробів.

В даній статті розглянуто ергодинамічний підхід до розв'язання задачі оцінки пошкоджуваності зміцнених деталей за їх твердістю.

Раніше [1] були отримані рівняння для оцінки основних структурних параметрів за твердістю.

Використовуючи цю методику визначення структурних параметрів за твердістю й формулу

$$\dot{u} = A_{\Sigma} \cdot sh \left( \frac{\alpha \sigma_i^2 - \nu u_e}{2kT} \right), \quad (1)$$

можна отримати вираз, що характеризує зміну твердості матеріалу з накопиченням в ньому ушкоджень

$$HV = \left[ \frac{1}{K_4 K_2} \left( \ln \frac{\exp K_3 t - C_1}{\exp K_3 t + C_1} + K_1 \right) \right]^{0.42}, \quad (2)$$

тут

$$K_4 = \frac{1}{1337G} \left( 1,2 \cdot 10^{-3} + 6,47 \cdot 10^{-6} HV_0 \right)^{-2}; \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{\alpha \sigma_i^2}{2kT}; \quad K_2 = \frac{\nu}{2kT}; \quad K_3 = K_2 A, \quad (4)$$

тобто всі параметри даного рівняння можуть бути визначені за твердістю.

Рівняння (2) описує кінетику пошкоджуваності досліджуваного матеріалу, що оцінюється зміною твердості HV у залежності від часу роботи даної деталі. Його аналіз показує, що зі зростанням часу навантаження інтенсивність пошкоджуваності  $d(HV)/dt$  зменшується. Цей факт відповідає явищам, що спостерігаються на практиці.

Якщо тепер в (2) підставити критичне значення твердості  $HV_*$ , то можна оцінити час  $t_*$ , який здатна пропрацювати деталь до того моменту, коли в матеріалі будуть створені умови для виникнення тріщини

$$t_* = \frac{1}{K_3} \left[ \ln \frac{1 - \exp(K_2 K_4 HV_0^{2,4} - K_1)}{1 + \exp(K_2 K_4 HV_0^{2,4} - K_1)} - \ln \frac{1 - \exp(K_2 K_4 HV_*^{2,4} - K_1)}{1 - \exp(K_2 K_4 HV_0^{2,4} - K_1)} \right]. \quad (5)$$

У разі досягнення в досліджуваному об'ємі матеріалу твердості критичного значення, по закінченні часу  $t_*$ , різко зростає ймовірність утворення в ньому тріщини.

Вираз (2) описує характер зміни твердості в процесі навантаження. Для оцінки його придатності є цікавим вивчення кінетики зміни твердості в процесі циклічної пошкоджуваності. Питанню зміни твердості (та мікротвердості) в результаті циклування присвячено цілий ряд праць [2...7]. Отримані результати в узагальненому вигляді показані на рис. 1.

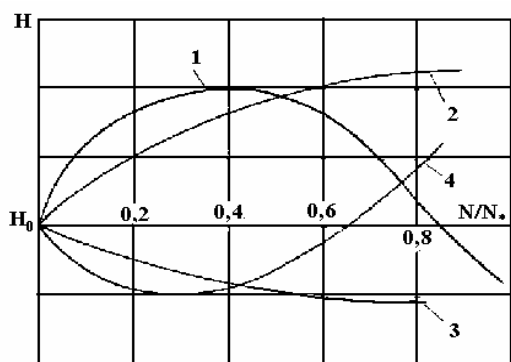


Рис. 1. Узагальнені криві зміни твердості поверхні зразків різних матеріалів при циклуванні ( $H_0$  — твердість поверхні у вихідному стані;  $N/N_*$  — відносне напруження)

У більшості з цих робіт відмічаються дві стадії в кінетиці зміни твердості: спочатку підвищення, а потім зниження до різних ступенів (іноді і нижче початкового значення). Розглянемо як найтипівіші результати роботи [3].

Досліджувалась сталь 45 і три марки чавунів різних класів. З результатами дослідження мікротвердості зіставлялися дані про розвиток тріщини втоми. Виявилось, що початкова стадія зміни мікротвердості характеризувалася зміцненням. Тривалість цього періоду залежала від рівня напружень: чим він був вище, тим інтенсивніше й швидше протікав процес зміцнення. Потім зміцнення змінювалося зменшенням міцності аж до зменшення твердості нижче початкового її значення. Кінетика зміни мікротвердості відповідала кривій 1 на рис. 1. Коли величина діючих напружень дорівнювала або була нижче межі витривалості, період зміцнення розповсюджувався на всю прийнятну базу випробувань, співпадаючи за характером із кривою 2.

На завершення автори [3] роблять висновок, що метод мікротвердості може бути використаний для кількісної оцінки ушкодження від втоми за межею витривалості матеріалів типу досліджуваних при тривалості дії напружень, що не перевищує 80...85 % загальної довговічності матеріалу на даному рівні напружень. Однак, яким чином цей метод слід використовувати — не вказано. Крім того, в роботі не говориться також про спосіб визначення межі витривалості в процесі накопичення пошкоджень від втоми.

Аналогічні за характером результати були отримані і нами під час дослідження твердості за Вікерсом поверхні зразків із сталей У9 та 30ХГСНА з різними видами циклічного навантаження.

Дослідження характеру зміни твердості сталі У9 проводились з консольним згином з обертанням. З'ясовано, що при напруженнях циклу, що перевищують межу витривалості, твердість змінюється у відповідності з кривою 1 на рис. 1, а при більш низьких напруженнях вона спочатку знижується, а потім зростає — як крива 4.

Сталь 30ХГСНА досліджувалась нами при випробуваннях на розтяг-стиск та віднульовий розтяг. Характер зміни твердості при випробуваннях вище межі витривалості відповідав кривій 1, а нижче межі витривалості — кривій 3.

Таким чином, наразі накопичено достатньо експериментального матеріалу, який потребує свого осмислення з єдиних позицій з метою пояснення різноманітного характеру поведінки кінетичних кривих зміни твердості.

Більшість досліджень характеру зміни твердості (мікротвердості) під час втоми обмежувались визначенням середньоарифметичних значень її за результатами 3—7 вимірів, без статичних характеристик одержуваного розсіювання. Виключення складають лише результати роботи [5], в якій проводилась статистична оцінка зміни твердості під час втоми, при цьому на кожному етапі виконувалось не менш ніж 200 вимірів. Таке докладне дослідження дозволило його авторам зробити висновок, що має велике значення для практичного використання наших результатів: зміцнення зерен, що характеризується різноманітною початковою твердістю, починається, в першу чергу, із зміцнення зерен мінімальної мікротвердості; відповідно до цього проходить зменшення розсіювання. Тому, середнє арифметичне значення твердості не може характеризувати зміну властивостей матеріалу під час циклічного навантаження, більш об'єктивною характеристикою може бути зсув лівої гілки кривої розподілу мікротвердості вправо та зменшення середньоквадратичного відхилення або дисперсії одержуваних результатів. Значення ж критичної твердості слід визначати за мінімумом значення початкової твердості, що обчислюється з відповідною довірчою ймовірністю за теоретичною кривою розподілу мікротвердості, що побудована шляхом обробки експериментальних даних.

Для перевірки вищесказаних положень було проведено дослідження характеру зміни кривих розподілу мікротвердості сталі 30ХГСНА в загартованому та низьковідпущеному стані під час циклічного навантаження змінним розтяганням-стисканням зразків на випробувальній машині ЦДМ-Пу-10. Досліджувались дві партії зразків — поверхня першої електрополірувалась, другої — шліфувалась. Обидві партії термооброблялись різними садками, внаслідок чого були отримані різні криві розподілу твердості матеріалу у початковому стані.

Усі зразки випробовувались до різних ступенів циклічного напруження при 800 МПа; попередньо визначена середня довговічність з такими напруженнями складала  $10^5$  циклів.

Після заданої кількості циклів зразки знімалися та вирізалась їх центральна частина, з якої виготовлялись косі шліфи за відомою методикою шляхом шліфування на металографічному шліфувальному папері із зернистістю, що зменшувалась, та наступним поліруванням на повстяному крузі з використанням оксиду хрому. Проведене дослідження впливу такої обробки та електрополірування на мікротвердість досліджуваної сталі у вказаному стані показало, що мікротвердість електрополірованих та неелектрополірованих шліфів співпадала при навантаженні, що перевищувало 0,5 Н. Тому в подальшому обмежувались механічним поліруванням. Для кожної заданої кількості циклів випробовувалось по два зразки; для кожного твердість вимірялась у трьох перерізах, розташованих на різних відстанях від поверхні зразка. Це дозволило побудувати криві розподілу твердості в залежності від кількості циклів напруження та глибини залягання досліджуваного шару, що дало можливість оцінити відмінності в накопиченні енергії приповерхневими та більш глибоко розташованими шарами матеріалу.

Результати, одержані при дослідженні електрополірованих зразків, подані на рис. 2; шліфованих — на рис. 3. Розрахунки проводились на ЕОМ із використанням стандартних підпрограм пакету STATISTICA

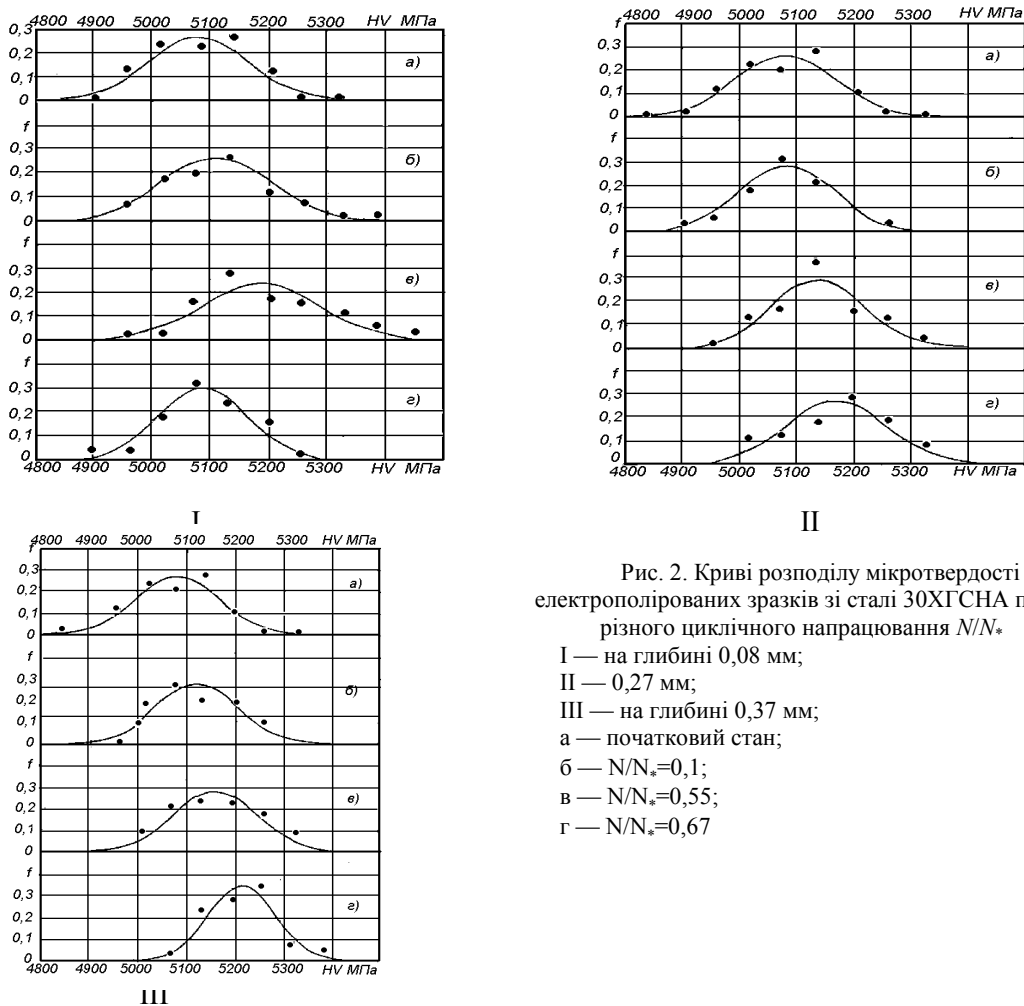


Рис. 2. Криві розподілу мікротвердості електрополірованих зразків зі сталі 30ХГСНА після різного циклічного напруження  $N/N_*$

- I — на глибині 0,08 мм;
- II — 0,27 мм;
- III — на глибині 0,37 мм;
- а — початковий стан;
- б —  $N/N_*=0,1$ ;
- в —  $N/N_*=0,55$ ;
- г —  $N/N_*=0,67$

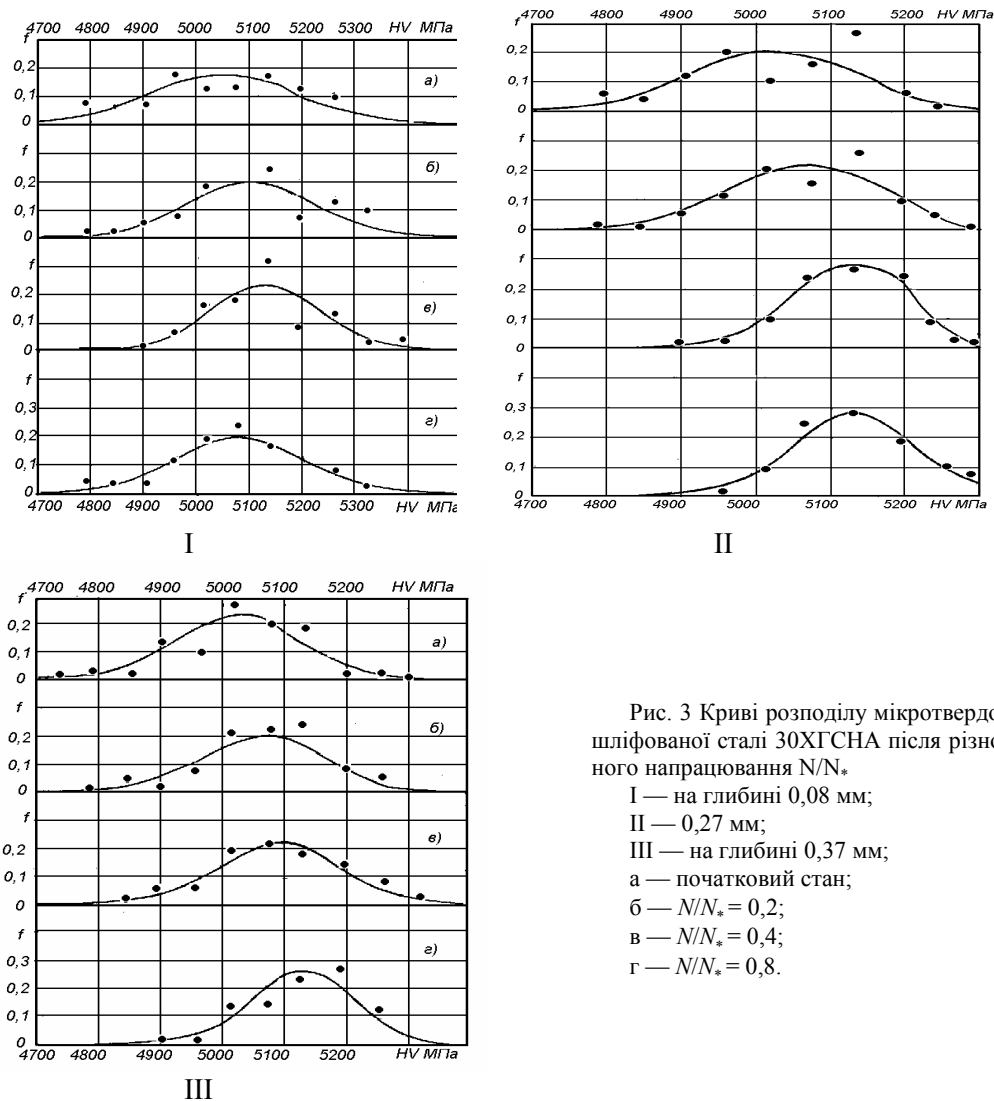


Рис. 3 Криві розподілу мікротвердості зразків шліфованої сталі 30Х18Н9 після різного циклічного напруження  $N/N_*$   
 I — на глибині 0,08 мм;  
 II — 0,27 мм;  
 III — на глибині 0,37 мм;  
 а — початковий стан;  
 б —  $N/N_* = 0,2$ ;  
 в —  $N/N_* = 0,4$ ;  
 г —  $N/N_* = 0,8$ .

На рис. 4 показано характер зміни мінімальних, максимальних та середніх значень мікротвердості в залежності від кількості циклів навантаження.

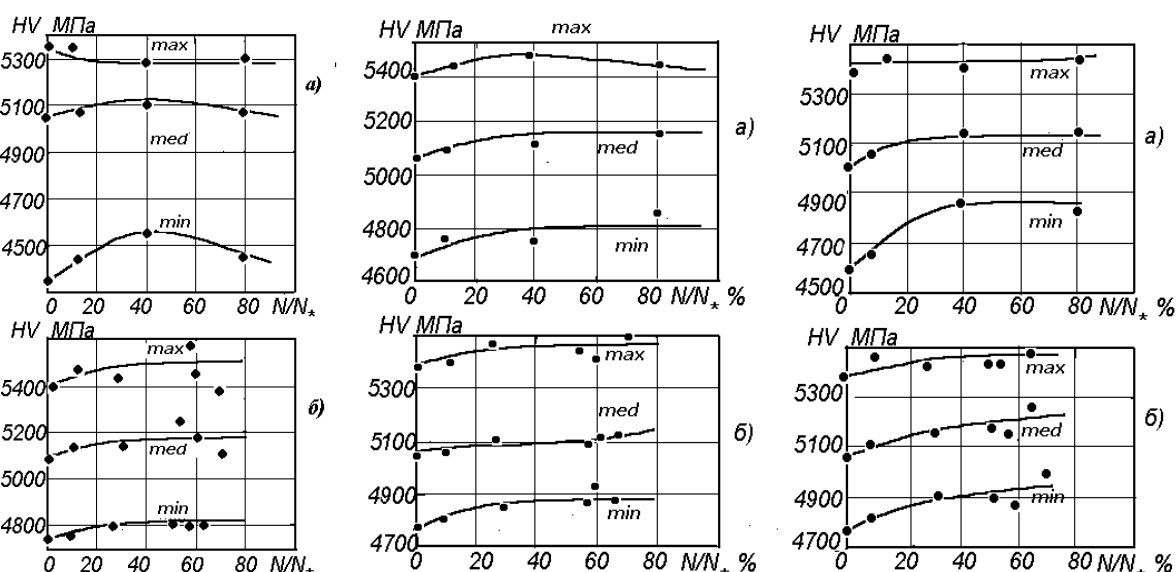


Рис. 4. Характер зміни мінімальних, максимальних та середніх значень мікротвердості шліфованих (а) та полірованих (б) зразків у залежності від циклічного напруження:  
 I — на глибині 0,08 мм; II — 0,27 мм; III — на глибині 0,37 мм від поверхні

Мінімальні та максимальні значення визначалися за формулою

$$HV = HV_{cp} \pm ls, \quad (6)$$

в якій знак «плюс» приймається для обчислення максимального, а знак «мінус» — для мінімального значень розподілення мікротвердості. Величина  $l$  залежить від об'єму вибірки та довірчої ймовірності. В нашому випадку для довірчої ймовірності  $P = 95\%$  та обсягу вибірки  $n = 100$   $l = 3,6$  [8].

Аналіз отриманих результатів показує, що під час циклування основне накопичення енергії здійснюється в найслабкіших мікрооб'ємах, що мають найменшу мікротвердість. Мінімальні значення твердості збільшуються, середні — збільшуються менш інтенсивно, максимальні — зростають дуже повільно.

Мікрооб'єми, розташовані на глибині 0,27 мм та 0,37 мм від поверхні деталей, накопичують енергію однаково, і характеризуються подібними кривими накопичення мікротвердості. Інакше поведуться мікрооб'єми, близькі до поверхні. У шліфованих зразках мінімальні значення мікротвердості спочатку швидко збільшуються, досягаючи максимуму при 40 % напрацювання, а потім починають зменшуватися. В електрополірованих зразках мінімальні значення мікротвердості повільно зростають протягом всього досліджуваного періоду, в той час як максимальні та середні значення починають знижуватися після 55 % напрацювання. Ці явища є наслідком впливу поверхні, для встановлення якого необхідна постановка та проведення більш широких досліджень. Тут буде впливати і шорсткість поверхні, і можливість звільнення енергії через поверхню, і ряд інших факторів, передбачити дію яких у теперішній час не є можливим. Одне можна стверджувати без сумнівів — вплив поверхні відчутний і на глибині 0,08 мм, що не може бути пояснено тільки різною шорсткістю поверхні.

Проведені експерименти дозволяють зробити висновки, що накопичення енергії при втомі проходить у найслабкіших мікрооб'ємах, що проявляється в зсуві вправо лівої гілки кривої розподілу мікротвердості. Більше того, саме ці мікрооб'єми визначають довговічність деталі в цілому.

#### Висновки

1. Отримані залежності, які описують зміну твердості в мікрооб'ємах, що накопичують утомні пошкодження
2. Встановлено, що величина критичної твердості матеріалів і її залежність від вихідного значення дозволяє прогнозувати втомну довговічність за результатами заміру твердості. При цьому враховувалось, що відповідальними за втомне руйнування є мікрооб'єми, які мають мінімальне значення твердості.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дослідження процесів накопичення пошкоджень у матеріалах при циклічному деформуванні: Огляд моделей накопичення пошкоджень. — Вінниця, 1999. — 30 с. — Держреєстрація № 0199U003427.
2. Баранов В. В. Исследование локальных методов определения критериев усталости: Автореф. ... канд. техн. наук. — М., 1974. — 19 с.
3. Крамаренко О. Ю., Куликовская О. В. Применение метода микротвердости при оценке усталостного повреждения. — Заводск. лаборатория, 1972, 38. — № 1. — С. 80—85.
4. Беляев В. И. Исследование процесса усталости металлов. — Минск: Изд-во МВССиПО БССР, 1962. — 111 с.
5. Гольденберг А. А., Олькин Б. И., Воробьев А. З. Микротвердость конструкционных материалов под воздействием циклических нагрузжений. — Заводск. лаборатория, 1969. — № 3. — С. 61—64.
6. Вигдорович В. Н. Измерение твердости как метод исследования материалов. — Заводск. лаборатория, 1965, 31. — № 8. — С. 993—1001.
7. Иванова В. С., Гордиенко Л. К. Изменение физических свойств металлов при циклическом нагружении. — Труды / АН СССР, Ин-т металлургии им. А. А. Байкова, 1963. Вып. 13. — С. 29—63.
8. Кукса Л. В. Закономерности развития микронеоднородной пластической деформации металлов // Пробл. прочно-сти. — 1979. — № 9. — С. 13—19.

Рекомендована кафедрою прикладної математики

Надійшла до редакції 10.06.03  
Рекомендована до друку 24.06.03

**Байло Віктор Григорович** — доцент кафедри технології підвищення зносостійкості; **Михалевич Володимир Маркусович** — завідувач кафедри прикладної математики; **Петраковська Наталія Олександрівна** — студентка Інституту машинобудування та транспорту.

Вінницький національний технічний університет