

УДК 669.539.43

А. Бялонович¹; Л. Матохнюк¹, канд. техн. наук;
О. Войналович², канд. техн. наук

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України

²Національний університет біоресурсів і природокористування України

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФУР'Є-ПЕРЕТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ СТРУКТУРИ

Резюме. Проведено дослідження опору втомі сталей 45 і X18N10T і змін структури в процесі циклічного навантаження. Накопичення втомних пошкоджень оцінювали шляхом статистичної обробки зображень мікроструктури. Як параметр, що характеризує стан матеріалу, використовували значення співвідношення малої і великої півосей еліпса Фур'є-перетворення цифрового зображення мікроструктури. Для кількісної характеристики змін структури матеріалу при циклічному навантаженні запропоновано коефіцієнт пошкодженості. Ця характеристика є інтегральною й інваріантною до амплітуди циклічного навантаження й асиметрії циклів. У стані, що передує втомному руйнуванню, коефіцієнт пошкодженості набуває визначене для даного матеріалу значення незалежно від параметрів навантаження і може бути критерієм втомного руйнування.

Ключові слова: втома, мікроструктура, довговічність, Фур'є-перетворення.

A. Bialonovich, L. Matokhniuk, A. Vojnalivich

PREDICTION OF RESIDUAL LIFE FOR STEELS USING FOURIER TRANSFORMATION OF DIGITAL IMAGE OF STRUCTURE

The summary. The investigation of the fatigue strength of steels 45 and X18N10T and the structural changes during cyclic loading has been carried out. Evaluation of the fatigue damage accumulation has been made by a statistical treatment of the microstructure images. The value of the eccentricity of ellipse in the Fourier transform of the material microstructure is used as a parameter characterizing the material state. A characteristic named material damage coefficient is proposed for quantitative assessment of the material structural changes during cyclic loading. This characteristic is integral and invariant to the cycle asymmetry and the load amplitude value. In the state preceding to the fatigue damage, the material damage coefficient takes a certain value irrespective of the applied load and the cycle asymmetry and can serve as the fatigue damage criterion. From the value of material damage coefficient conclusions can be drawn as to the residual lifetime of the structural material.

Key words: fatigue, microstructure, life duration, Fourier transform.

Постановка проблеми. Прогнозування залишкової довговічності металевих матеріалів, відповідальних за збереження міцності, працездатності й безпеки більшості машин, є актуальним завданням. Тому діагностування стану матеріалу, що зазнає циклічного навантаження, необхідне у різних галузях техніки для вирішення питань продовження ресурсу роботи виробу. Особливо це стосується дорогого устаткування та обладнання, що постійно перебуває в експлуатації. У таких випадках вихід з ладу обладнання, як і його передчасне замінення, пов'язані з істотними витратами. Через це застосовують різні методи неруйнівного контролю, частина яких заснована на аналізі фізичних властивостей поверхневого шару матеріалу. Це пов'язано з тим, що зародження і розвиток втомної тріщини, як правило, відбувається у приповерхневому шарі матеріалу. Аналізу структури матеріалу, що зазнає впливу циклічного навантаження, присвячено багато робіт. Але висновки щодо проведених робіт, як правило, є описово якісними. Такий підхід має певні переваги, адже дозволяє отримати дані про механізми накопичування пошкодження і руйнування матеріалу. З іншого

боку, щоб оцінити стан матеріалу після певної кількості циклів навантаження, необхідно мати кількісну характеристику, яка б однозначно відображала ступінь накопичення втомного пошкодження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливістю еволюції структурного стану металевих матеріалів у разі дії циклічного навантаження є тривалий період і негомогенний характер. Вид матеріалу й умови циклічного навантаження істотно впливають на розмір і локалізацію зон структурних змін [1]. Ці зони розташовані на тлі практично незмінної структури, а їх розмір в основному об'ємі матеріалу не перевищує кількох десятків мікрон [2, 3]. Тому їх внесок у картину структурного стану матеріалу невеликий. Але зі збільшенням потужностей обчислювальної техніки, а також розвитком технології цифрової фотографії, останнім часом аналіз зображень все ширше стали застосовувати у різних галузях техніки. Вивчення процесів втомного пошкодження також не залишилося осторонь. Застосування різних алгоритмів оброблення цифрових знімків знайшли відображення у галузі дослідження дислокаційної структури [4], фрактографічного аналізу [5], дослідження смуг ковзання [6].

Мета роботи. Створення методу кількісного оцінювання накопичення втомних пошкоджень як результату обробки безпосередньо зображення мікроструктури матеріалу і на його основі – прогнозування залишкової довговічності матеріалу конструкції.

Постановка завдання. Аналіз структурних змін у матеріалі, що знаходиться під дією циклічних навантажень, складається з двох етапів. Перший етап – отримання цифрових зображень матеріалу після певної кількості циклів навантаження. Другий етап – безпосередній аналіз отриманих цифрових зображень.

Методика проведення досліджень. Дослідження структурних змін у разі дії циклічного навантаження проводили на зразках зі сталей 45 і X18H10T. Зразки зі сталі 45 виточували з прутка і фрезерували робочу частину, як показано на рис. 1.

Зразки зі сталі X18H10T вирізували з листа товщиною 3 мм.

Поверхні робочої частини зразків полірували і протравлювали до виявлення структури. Перед проведенням втомних випробувань на оптичному мікроскопі робили знімки області, які були початковими зображеннями структури. Потім проводили втомні випробування з частотою навантаження 120 Гц.

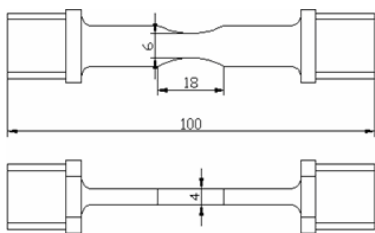


Рисунок 1. Зразок зі сталі 45 для випробувань на втому

Випробування зразків зі сталі 45 проводили для трьох різних значень коефіцієнта асиметрії циклу ($R = -1; 0$ і 0.5) за кімнатної температури, а зразки з X18H10T випробовували для $R = 0$ і $0,5$ за умов кімнатної температури і $R = 0$ за температур $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результати втомних випробувань представлено на рис. 2 і 3. Для апроксимації експериментальних даних використовували рівняння кривої втоми [1]

$$\sigma_a = \sigma_o + c / \sqrt{N} , \quad (1)$$

де σ_a – амплітудне значення напружень; σ_o – границя витривалості на необмеженій базі; N – кількість циклів до зруйнування; c – параметр, що залежить від частоти навантаження. Як бачимо з рисунків, рівняння (1) добре описує результати експериментального визначення довговічності зразків.

У процесі втомних випробувань, після заданої кількості циклів навантаження, знову фотографували мікроструктуру робочої частини зразка.

Мікроструктуру матеріалу в початковому стані досліджували у разі збільшення 50, 100, 200 і 500. На підставі отриманих зображень вибирали оптимальне збільшення, що дає найбільший обсяг інформації. Для сталі 45 воно дорівнювало 50, а для сталі X18H10T – 100. Подальший розгляд структури проводили за таких же збільшень.

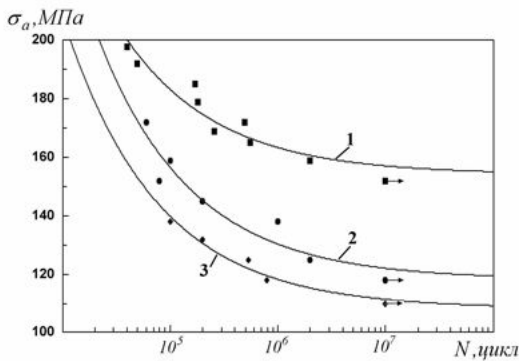


Рисунок 2. Результати втомних випробувань сталі 45 з різними значеннями коефіцієнта асиметрії циклів:
1 – R = -1; 2 – R = 0; 3 – R = 0.5

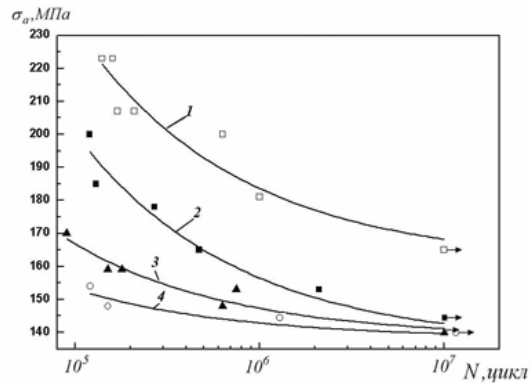


Рисунок 3. Криві втоми сталі X18H10T:
1 – R = 0, T = 20 °C; 2 – R = 0,5, T = 20 °C;
3 – R = 0, T = 300 °C;
4 – R = 0, T = 500 °C

Методика оброблення зображення структури. Для оброблення результатів мікроструктурних досліджень нині часто використовують ефект оптичного перетворення зображення для отримання енергетичної картини двовимірного Фур'є-перетворення та аналізують цифрові знімки зображень [7, 8]. Для кількісної характеристики зображення у теорії оброблення цифрових зображень застосовують так звані дескриптори областей [9]. До них належать статистичні дескриптори, які характеризують середню яскравість, контраст, ентропію, зображення та ін.; інваріантні дескриптори, величина яких не залежить від таких параметрів, як зміна масштабу, поворот, трансляція зображення, а також дескриптори, які отримують на підставі двовимірного Фур'є-перетворення. Попередньо проведені дослідження показали, що найзручнішими для дослідження еволюції структури є дескриптори, отримані на підставі двовимірного Фур'є-перетворення. Використання Фур'є-перетворення зображення пов'язано з тим, що це перетворення ідеально підходить для аналізу періодичних або квазіперіодичних структур, які виникають у результаті впливу циклічного навантаження [10]. Ці глобальні текстурні образи можна легко виокремити на спектрі у вигляді імпульсів з високою енергією, але їх дуже непросто виявити за допомогою просторових методів оброблення, які є локальними за своєю природою.

Під час визначення інтегральної характеристики спрямованості періодичної або квазіперіодичної структури на підставі отриманої двовимірної матриці коефіцієнтів Фур'є-перетворення розраховують ексцентриситет еліпса, другі моменти якого збігаються з другими моментами матриці коефіцієнтів Фур'є.

Для визначення ексцентриситету насамперед розраховують моменти першого порядку, які також є координатами центру мас,

$$X_0 = \frac{\sum \sum f(x, y)x}{\sum \sum f(x, y)}, \quad Y_0 = \frac{\sum \sum f(x, y)y}{\sum \sum f(x, y)},$$

де $f(x, y)$ – значення коефіцієнта Фур'є у матриці (x – рядок, y – стовпчик). Підсумовування проводять по всіх рядках і стовпцях матриці. Далі знаходять моменти другого порядку

$$m_{20} = \sum \sum f(x, y)(x - X_0)^2,$$

$$m_{02} = \sum \sum f(x, y)(y - Y_0)^2,$$

$$m_{11} = \sum \sum f(x, y)(x - X_0)(y - Y_0).$$

На підставі отриманих даних визначають ексцентриситет еліпса, який відображає відношення між меншою і більшою півосями і є мірою анізотропії структури,

$$e = \frac{m_{20} + m_{02} - \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}{m_{20} + m_{02} + \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}. \quad (2)$$

У випадку, коли зображення не має спрямованих структур, значення ексцентриситету неістотно відрізняється від одиниці. У разі збільшення кількості періодичних або квазіперіодичних структур з напрямком співпадання значення ексцентриситету зменшується. Однією з особливостей такої характеристики зображення є її інваріантність щодо повороту [11]. Величину e можна розглядати як параметр, який характеризує Фур'є-образ цифрового зображення структури матеріалу. Враховуючи, що внаслідок накопичення втомних пошкоджень структура матеріалу змінюється, він кількісно визначає її поточний стан. Детальніше методику оброблення зображення структури викладено у роботі [12].

Результати досліджень змін структури. На рис. 4 і 5 зображено структуру сталі 45 у початковому стані й після напрацювання 90% довговічності. Зображення структури матеріалу в початковому стані, як правило, не мають яскраво виражених за формою і впорядкованістю елементів. Підвищене значення енергії спектра в напрямку 90° і 270° пов'язано з наявністю певної впорядкованості у структурі, яку спричинено вальцюванням. На рис. 5а візуально видно деяку зміну структури матеріалу внаслідок циклічного навантаження, але дати однозначну відповідь про ступінь пошкоженості неможливо. Під час розглядання діаграми розподілу коефіцієнтів Фур'є (рис. 5б) бачимо, що на тлі початкової спрямованості структури з'являються нові складники, які характеризують пошкоджуваність матеріалу внаслідок впливу циклічного навантаження.

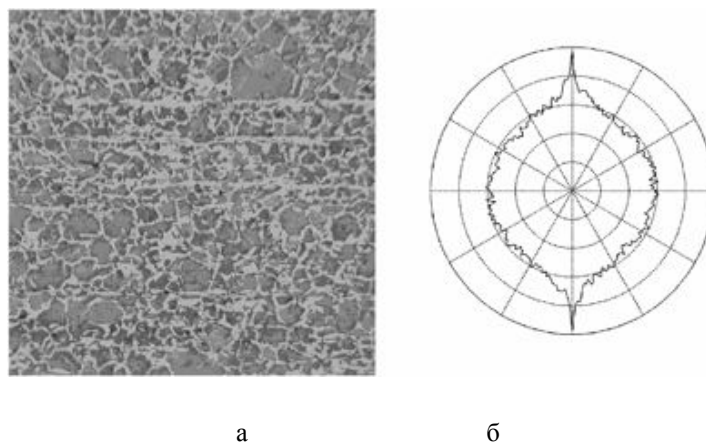


Рисунок 4. Початкова структура сталі 45 (а) і результати оброблення її зображення; діаграма середнього розподілу коефіцієнтів Фур'є за напрямками (б)

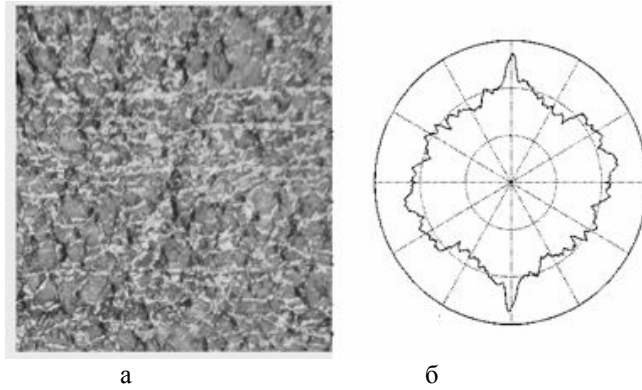


Рисунок 5. Структура сталі 45 після напрацювання 90% циклів до зруйнування: *a* – структура матеріалу; *б* – діаграма середнього розподілу коефіцієнтів Фур’є за напрямком

За співвідношенням (2) розраховували параметр e , який характеризує Фур’є-образ цифрового зображення структури матеріалу. Про зміну структури матеріалу робили висновок за різницею між значеннями коефіцієнта (2) у початковому стані матеріалу $e_{поч}$ і у процесі циклічного навантаження e . Як приклад, на рис. 6 наведено графіки змінення $e_{поч} - e$ від кількості циклів навантаження сталі 45 за різних значень амплітуди напружень від нульового циклу. З наведених даних випливає, що за нижчих амплітуд навантаження такі зміни менші, ніж за високих. Це пояснюється тим, що за менших амплітуд циклічного навантаження кількість локальних місць мікропластичного деформування, де можлива поява початкової тріщини, менша [1], що відображається на ступені змінення $e_{поч} - e$. Руйнування зразків відбувається також за нижчих значень зазначеного параметра. Потрібно вказати, що параметр $e_{поч} - e$ змінюється монотонно, тобто накопичення втомних пошкоджень спостерігається протягом усього досліджуваного періоду (від 10% до 90% довговічності) навантаження зразків, без стадії стабілізації структури.

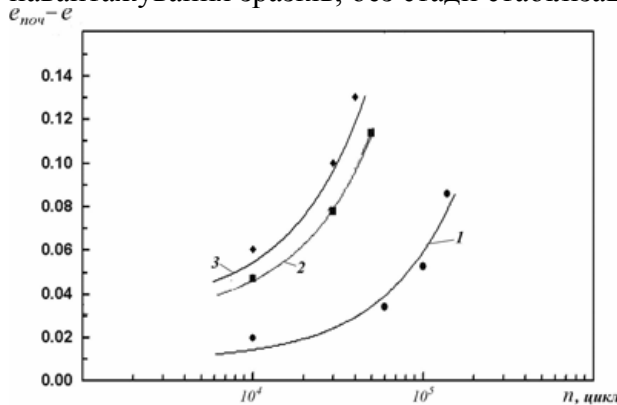


Рисунок 6. Залежність приросту параметра Фур’є-перетворення зображення структури сталі 45 від кількості циклів навантаження

($R = 0$; 1 - $\sigma_a = 145$ МПа,

2 - $\sigma_a = 159$ МПа,

3 - $\sigma_a = 172$ МПа)

Якщо як характеристику пошкоженості матеріалу використати величину

$$k = \frac{e_{поч} - e}{\sigma_{max}} \sigma_{0,2}, \quad (3)$$

де σ_{max} – максимальне напруження циклу навантаження, а $\sigma_{0,2}$ – границя текучості матеріалу, то картина істотно зміниться. На рис. 7–10 наведено графіки змінення коефіцієнта k залежно від поточної кількості циклів n , віднесеної до кількості циклів до зруйнування зразка N . Бачимо, що цей параметр зростає монотонно і досягає певної величини до моменту появи втомної тріщини. Для кожного матеріалу за даної температури він підлягає одній закономірності, звичайно з урахуванням розкидання експериментальних значень, незалежно від амплітуди прикладеного навантаження, а також коефіцієнта асиметрії циклу. Його можна вважати параметром, який характеризує пошкоджуваність матеріалу за циклічного навантаження (коефіцієнтом пошкоженості матеріалу).

На рис. 11 показано залежність коефіцієнта пошкодженості матеріалу від максимального напруження циклу в момент, коли до появи макротріщини залишається 10% довговічності (k_{\max}). З наведених даних випливає, що значення коефіцієнта пошкодженості, що відповідає величині k_{\max} , характеризує стан структури матеріалу безпосередньо перед руйнуванням незалежно від амплітуди і асиметрії циклів навантажування. Через це параметр k_{\max} можна розглядати як структурний критерій руйнування матеріалу за циклічного навантажування.

Встановивши залежність коефіцієнта пошкодженості матеріалу і величину структурного критерію руйнування k_{\max} , можна визначити залишкову довговічність матеріалу конструкції.

Рівняння лінійної регресії будували у програмному пакеті Statistica. Для аналізу довірчого інтервалу використовували метод множинної регресії. Рівень значущості становив $\alpha = 0,1$, що відповідає 90% довірчого інтервалу. Межі для передбачення було встановлено $\pm 0,1$, що відповідає ймовірності 90%.

Для сталі 45 за 20°C і певного значення коефіцієнта пошкодженості з вірогідністю 90% значення відносного напрацювання буде перебувати у межах 20%-го інтервалу. Для граничної величини $k_{\max} = 0,135$ значення відносного напрацювання становитиме $84\% \pm 10\%$.

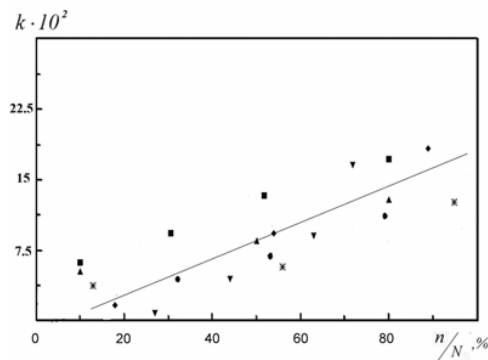


Рисунок 7. Залежність коефіцієнта k від відносної довговічності сталі 45.

R = -1: \blacklozenge – $\sigma_a = 192$ МПа, \blacktriangledown – $\sigma_a = 165$ МПа,
R = 0: \bullet – $\sigma_a = 145$ МПа, \blacksquare – $\sigma_a = 159$ МПа,
 \blacktriangle – $\sigma_a = 172$ МПа. R = 0,5: $*$ – $\sigma_a = 118$ МПа

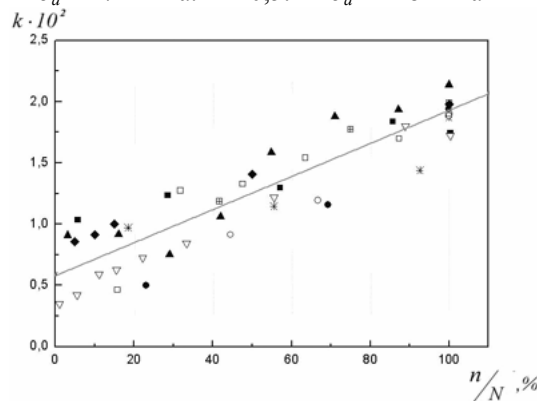


Рисунок 8. Залежність коефіцієнта k від відносної довговічності сталі X18H10T. $T = 20^{\circ}\text{C}$.

R = -1: \blacksquare – $\sigma_a = 223$ МПа,
 \blacktriangle – $\sigma_a = 210$ МПа, \square – $\sigma_a = 200$ МПа,
 \blacktriangledown – $\sigma_a = 180$ МПа.
R = 0,5: \boxplus – $\sigma_a = 200$ МПа, \bullet – $\sigma_a = 185$ МПа,
 \circ – $\sigma_a = 165$ МПа, \blacklozenge – $\sigma_a = 153$ МПа,
 $*$ – $\sigma_a = 178$ МПа

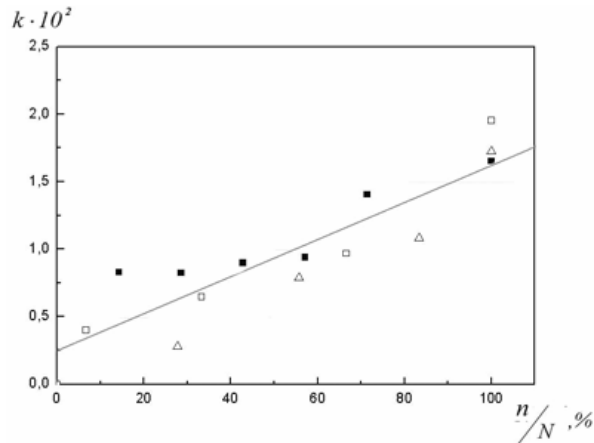


Рисунок 9. Залежність коефіцієнта k від відносної довговічності сталі X18H10T. $T = 300^{\circ}\text{C}$.
 $R = -1$: ■ – $\sigma_a = 154$ МПа, □ – $\sigma_a = 160$ МПа,
 \triangle – $\sigma_a = 170$ МПа

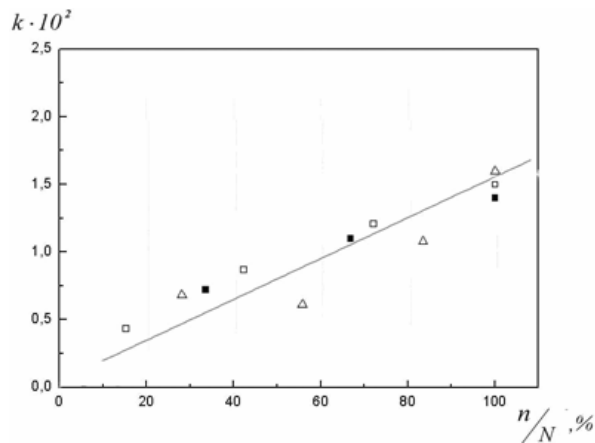


Рисунок 10. Залежність коефіцієнта k від відносної довговічності сталі X18H10T.
 $T = 500^{\circ}\text{C}$. $R = -1$: ■ – $\sigma_a = 148$ МПа,
 \triangle – $\sigma_a = 154$ МПа; □ – $\sigma_a = 150$ МПа

Для сталі X18H10T за 20°C і певного значення коефіцієнта пошкодженості з вірогідністю 90% значення відносного напрацювання буде перебувати у межах 15%-го інтервалу. Для граничної величини $k_{\max} = 0,019$ значення відносного напрацювання становитиме $89\% \pm 6\%$. За температури 300°C і певного значення коефіцієнта пошкодженості з вірогідністю 90% значення відносного напрацювання буде перебувати у межах 20%-го інтервалу. Для граничної величини $k_{\max} = 0,017$ значення відносного напрацювання становитиме $84\% \pm 10\%$. За температури 500°C і певного значення коефіцієнта пошкодженості з вірогідністю 90% значення відносного напрацювання буде перебувати у межах 30%-го інтервалу. Для граничної величини $k_{\max} = 0,015$ значення відносного напрацювання становитиме $85\% \pm 15\%$.

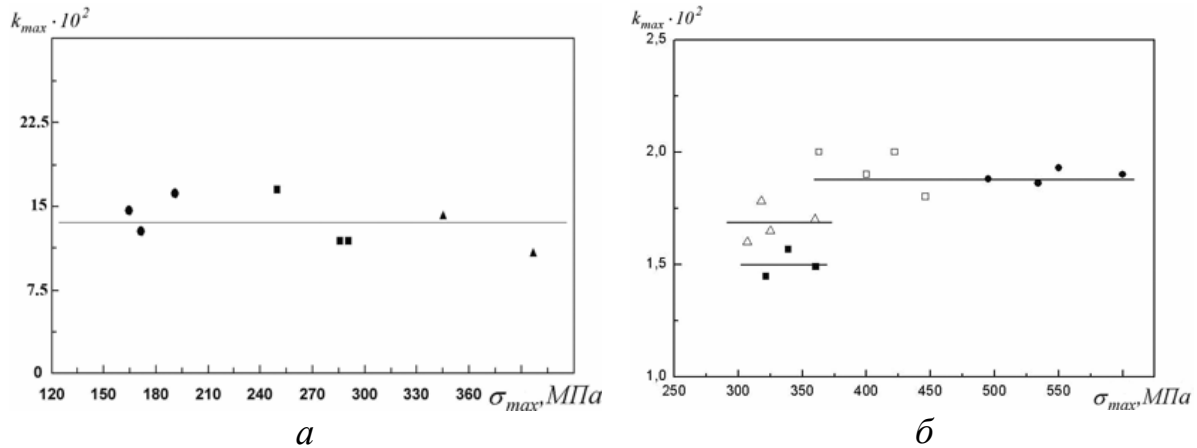


Рисунок 11. Залежність граничного значення k від максимального напруження циклу:

a – для сталі 45; b – для сталі X18H10T (■ – $R = 0$, $T = 500$ °C; Δ – $R = 0$, $T = 300$ °C;
□ – $R = 0$, $T = 20$ °C; ● – $R = 0,5$, $T = 20$ °C)

Висновки. Запропоновано процедуру дослідження накопичення втомних пошкоджень у металевому матеріалі шляхом статистичного оброблення зображення мікроструктури матеріалу під час циклічного навантажування. Як характеристику стану матеріалу використовували значення ексцентриситету еліпса Фур'є-перетворення зображення мікроструктури. На сталях 45 і X18H10T показано, що інтегральна інтенсивність еволюції структури знижується зі зменшенням амплітуди циклічного навантаження, що пов'язано зі зменшенням кількості мікрозон, де розвиваються мікропластичні деформації, що призводять до втомного зруйнування. Отримано характеристику структури матеріалу, названу коефіцієнтом пошкодженості матеріалу, яка однозначно характеризує еволюцію структури через накопичення втомних пошкоджень. Ця характеристика є інтегральною та інваріантною щодо асиметрії циклів і величини амплітуди навантаження за певної температури випробувань. У стані, що передує втомному руйнуванню, коефіцієнт пошкодженості матеріалу набуває певного значення, незалежно від прикладеного навантаження та асиметрії циклу, і може служити критерієм зруйнування за циклічного навантажування. Показано, що встановлення залежності коефіцієнта пошкодженості матеріалу від напрацювання за дії циклічного навантажування і граничного значення цього коефіцієнта дозволяють прогнозувати залишкову довговічність матеріалу конструкції за певної температури експлуатації.

Література

1. Яковлева, Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов [Текст] / Т.Ю. Яковлева. – Киев: Наукова думка, 2003. – 235 с.
2. Коцаньда, С. Усталостное растрескивание металлов; пер. с польск. [Текст] / С. Коцаньда; под ред. С.Я. Яремы. – М.: Металлургия, 1990. – 623 с.
3. Иванова, В.С. Природа усталости металлов [Текст] / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
4. Mayama T, Sasaki K., Kuroda M. Quantitative evaluations for strain amplitude dependent organization of dislocation structures due to cyclic plasticity in austenitic stainless steel 316L // Acta mater. – 2008. – 56, No.12. – P. 2735–2743.
5. Sozańska M., Iacoviello F., Cwajna J., Jerome M., Sojka J., Galland J. Quantitative analysis of fatigue fracture surface in the duplex steel // Image Anal. Stereol. – 2002 – 21, Is.1. – P.55–59.
6. Herasymchuk O.M. Nonlinear relationship between the fatigue limit and quantitative parameters of material microstructure // Int. Journal of Fatigue. – 2011. – 33, Is. 4. – P. 649–659.
7. Gui-Rong Weng. Image processing and classification of metal fracture surface. Wavelet Analysis and Pattern Recognition, – 2008. ICWAPR '08. International Conference on. vol. 1. – P. 163–167.
8. Early detection of metal fatigue with a coherent optical cross-correlation process pattern recognition apparatus utilizing complex spatial filtering Burckhardt et al. - March 1969. – 3435244.

9. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
10. Holota R., Němeček S. Recognition of oriented structures by 2D Fourier transform // Applied Electronics. Plzeň, Západočeská univerzita. – 2002. – P. 88–92.
11. Zhang J., Tan T. New texture signatures and their use in rotation invariant texture classification // Proc. of Texture 2002 (The 2nd International workshop on texture analysis and synthesis with ECCV 2002). – P. 157–162.
12. Бялонович, А.В. Количественный анализ изменений структуры материала при воздействии циклической нагрузки [Текст] / А.В. Бялонович // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2010. – Вып. 33. – С. 239–247.

Отримано 15.07.2011