

До розробки деформаційного критерію малоциклової втоми

М. В. Бородій

Інститут проблем міцності НАН України, Київ, Україна

На основі аналізу експериментальних даних малоциклової втоми за одновісного та дво-вісного (непропорційного) деформування широкого класу металевих матеріалів запропоновано інженерний підхід до оцінки довговічності. Підхід базується на кореляційній лінійній залежності між приведеним розмахом деформацій та числом циклів до початку руйнування. Зазначений деформаційний параметр враховує як орієнтацію траєкторії циклу у просторі деформацій, так і ступінь її непропорційності. Використання деформаційного параметра як критеріального дозволило отримати задовільні результати при прогнозуванні довговічності.

Ключові слова: малоциклова втома, розмах деформацій, форма циклу, конструкційні матеріали, прогнозування довговічності.

Вступ. Прогнозування довговічності матеріалу до стадії виникнення макротріщини є однією з основних проблем теорії малоциклової втоми. Значна кількість робіт, виконаних в останнє десятиріччя в різних наукових центрах і лабораторіях, що займаються вирішенням даної проблеми, присвячена отриманню експериментальних залежностей малоциклової втоми за різних режимів деформування та навантажування з урахуванням впливу температури, швидкості навантажування, асиметрії циклу та ін. В основному ці роботи стосувалися найбільш простого виду випробувань, а саме: одновісного деформування розтягом–стиском або крученням. За отриманими даними для широкого класу конструкційних матеріалів побудовано криві малоциклової втоми. Надалі вони використовувалися безпосередньо як критеріальні залежності переходу матеріалу в граничний стан під час циклічного деформування [1, 2], а при розробці більш складних критеріальних залежностей, що враховували вид напружено-деформованого стану, були основним джерелом експериментальної інформації для отримання необхідних констант матеріалу [3, 4]. Порівняльний аналіз застосування подібних критеріїв для оцінки довговічності за малоциклової втоми приведено в роботі [5].

Подальший прогрес у вивченні малоциклової втоми матеріалів був пов'язаний з експериментальними дослідженнями, в яких реалізовувалося двовісне і багатовісне деформування за складними циклічними траєкторіями [6–8]. Оскільки при “ускладненні” напружено-деформованого стану властивості більшості конструкційних матеріалів значно відрізняються від тих, що мають місце за одновісного деформування, за циклічного деформування ці відмінності проявляються значно більше. В першу чергу це виражається в деформаційному зміцненні або знеміцненні циклічно нестабільних матеріалів і відповідно значному розкиді даних по довговічності в залежності від форми циклу в експериментах на малоциклову втому. За цих обставин набуває актуальності задача щодо розробки моделей малоциклової втоми, які б враховували основні фактори, що суттєво впливають на довговічність

матеріалу за циклічного непропорційного деформування. Такими факторами є максимальний розмах деформацій та форма траєкторії циклу. Перший вважається класичним, оскільки на його основі побудована більшість деформаційних критеріїв малоциклової втоми. Другий почав лише недавно використовуватися при розробці модифікованих деформаційних критеріїв. Побудовані на його основі досить прості у використанні деформаційні критерії дозволяють, подібно енергетичним, враховувати додаткове деформаційне зміцнення, що проявляється у більшості конструкційних матеріалів за непропорційного деформування, в результаті чого можливо більш точно прогнозувати довговічність за складних режимів навантажування.

Ця робота є продовженням попередньої [9], де на основі аналізу експериментальних даних малоциклової втоми п'яти типів матеріалів був запропонований новий деформаційний параметр – приведений розмах деформацій. Його використання дозволило отримати однозначну, близьку до лінійної, залежність показників довговічності (число циклів до початку руйнування) від режиму деформування (розмах деформацій та форма циклу) як за пропорційного, так і непропорційного двовісного деформування. На відміну від роботи [9], де для отримання необхідних коефіцієнтів моделі застосовувався апроксимаційний підхід із використанням методу найменших квадратів, нижче запропоновано чіткі методики визначення зазначених коефіцієнтів за результатами обмеженої кількості базових експериментів та пропонується підхід до прогнозування довговічності.

Деформаційний параметр для непропорційної малоциклової втоми. Розглянемо циклічне навантажування, контроль за яким здійснюється за деформаціями (жорсткий режим). Повертаючись до роботи [9], нагадаємо форму запису деформаційного параметра – приведенного розмаху деформацій стосовно двовісного малоциклового деформування:

$$\Delta\varepsilon_{\text{пр}} = (1 + \alpha\Phi)(1 + k \sin \varphi)\Delta\varepsilon, \quad (1)$$

де $\Delta\varepsilon$ – максимальний розмах деформацій траєкторії циклу,

$$\Delta\varepsilon = \max \left[\sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + \frac{1}{3}(\gamma_A - \gamma_B)^2} \right]; \quad (2)$$

$\varepsilon_A, \varepsilon_B$ і γ_A, γ_B – осьові та зсувні деформації в момент часу A і B ; α – константа, що характеризує чутливість матеріалу до непропорційного деформування і може визначатися при порівнянні даних малоциклової втоми при пропорційному та непропорційному деформуванні за одного й того ж розмаху деформацій; Φ – коефіцієнт непропорційності траєкторії циклу, що встановлює однозначну залежність між рівнем деформаційного зміцнення матеріалу та формою циклу; k – константа матеріалу, що стосується лише пропорційного деформування і подібно константі α характеризує також чутливість матеріалу, але до виду напруженого стану. Цю константу можна визначити через ступінь наближення даних малоциклової втоми за довіль-

ного напруженого стану до залежності, побудованої за даними малоциклової втоми при базовому напруженому стані. За сталого значення амплітуди деформування базовий напружений стан визначається певним напрямком (головна вісь), циклічне пропорційне деформування вздовж якого характеризується максимальною довговічністю. Для різних матеріалів напрямками головної осі можуть бути прямолінійні траєкторії у двовимірному просторі, що відповідають розтягу–стиску, крученню або їх певній комбінації. Для більшості металевих матеріалів, як правило, – це напрямок чистого кручення.

Із всіх зазначених величин лише коефіцієнт непропорційності циклу Φ визначається безпосередньо за інформацією про форму траєкторії циклу. Метод визначення цього коефіцієнту неодноразово описувався раніше [10, 11], з метою скорочення викладок наводимо його схематично без докладних пояснень:

$$\Phi = \left(\left| \frac{\oint \mathbf{e} \times d\mathbf{e}}{L} \right| \middle/ \left| \frac{\oint \mathbf{e} \times d\mathbf{e}}{L_0} \right| \right)^r, \quad (3)$$

де

$$r = \left(1 - \left| \frac{\oint \mathbf{e} \times d\mathbf{e}}{L} \right| \middle/ \left| \frac{\oint \mathbf{e} \times d\mathbf{e}}{L_0} \right| \right) \cdot \frac{l}{4\Delta\varepsilon}. \quad (4)$$

Кут φ повороту довільної траєкторії циклу по відношенню до головної осі визначається досить просто, якщо заздалегідь відомо напрямок головної осі. Для більшості конструкційних матеріалів, з яких виготовляють відповідальні елементи конструкції, інформацію про особливості малоциклового руйнування за різних видів напруженого стану, а отже, і напрямок головної осі можна отримати з довідкової літератури. Напрямок головної осі характеризується максимальною довговічністю. При відсутності такої інформації необхідно виконати серію одновісних експериментів на малоциклову втому за певного значення розмаху деформацій та визначити напружений стан, за якого реалізується максимальна довговічність. Мінімальний кут між прямою, що зображає головну вісь у двовимірному просторі деформацій, і прямою, що визначає напрямок максимального розмаху деформацій циклу, є шуканим кутом повороту φ .

Більш складною є процедура знаходження констант матеріалу α і k , оскільки вимагає проведення певних базових експериментів. Очевидно, що для визначення параметра k можна обмежитися лише одновісними експериментами на малоциклову втому, в той час як для визначення параметра α слід виконати ще й малоциклові експерименти за двовісного деформування.

Будемо виходити з того, що існує лінійна залежність в логарифмічних координатах приведенного розмаху деформацій $\Delta\varepsilon_{пр}$ і числа циклів до початку руйнування (момент виникнення макротріщини) – рис. 1. Тоді для визначення параметра α достатньо провести три базових експерименти:

випробування на малоциклову втому за одновісного деформування для двох рівнів розмаху деформацій $\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2$ і випробування за будь-якого непропорційного двовісного деформування з розмахом $\Delta\varepsilon_1$ або $\Delta\varepsilon_2$. Тоді, дотримуючись позначень, що прийняті на рис. 1, коефіцієнт α знаходимо з наступного виразу:

$$\alpha = \frac{1}{\Phi} \left[\left(\frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta\varepsilon_2} \right)^{\lg \frac{N_2}{N_2} / \lg \frac{N_2}{N_1}} - 1 \right], \quad (5)$$

де N_1, N_2 – довговічності за одновісного деформування, що відповідають розмахам $\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2$ відповідно; \bar{N}_2 – довговічність за непропорційного деформування.

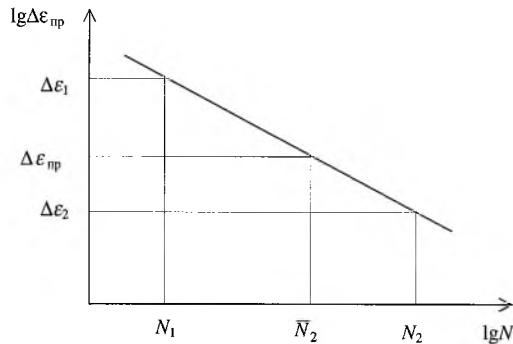


Рис. 1. Схема для визначення констант матеріалу.

Якщо заздалегідь відомий нахил прямої малоциклової втоми n за одновісного деформування, то вираз для визначення параметра α дещо спрощується:

$$\alpha = \frac{1}{\Phi} \left[\left(\frac{\bar{N}_2}{N_2} \right)^n - 1 \right]. \quad (6)$$

Зазначимо лише, що в цьому випадку можна скористатися даними двох базових експериментів – пропорційного і непропорційного малоциклового деформування для одного рівня розмаху деформацій.

Аналогічно можна отримати вирази для визначення параметра k . Як і в попередньому випадку, слід виконати, як мінімум, три одновісних базових експерименти за двох значень рівнів розмаху або амплітуд деформацій: два за різних рівнів розмаху деформацій при напруженому стані, що відповідає головному напрямку, а третій – при довільному іншому, що складає кут φ по відношенню до головного напрямку. Використовуючи ту ж схему, що й на рис. 1, отримаємо

$$k = \frac{1}{\sin \varphi} \left[\left(\frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta\varepsilon_2} \right)^{\lg \frac{N_2}{N_2} / \lg \frac{N_2}{N_1}} - 1 \right], \quad (7)$$

а у випадку, коли відомий нахил прямої малоциклової втоми n , маємо:

$$k = \frac{1}{\sin \varphi} \left[\left(\frac{\bar{N}_2}{N_2} \right)^n - 1 \right], \quad (8)$$

де \bar{N}_2 і N_2 – відповідно довговічність для довільної пропорційної траєкторії і максимальна довговічність для даного розмаху деформацій, що відповідає головному напрямку.

Застосування деформаційного параметра для аналізу експериментальних даних. Скористаємося параметром (1) для представлення експериментальних даних малоциклового двовісного деформування зразків із алюмінію (дві траєкторії), міді (дві траєкторії) і сталі 310 (три траєкторії) [12] та нержавіючої сталі 304 і алюмінієвого сплаву 6061 (14 траєкторій) [13]. В роботах [13, 14] приведено результати малоциклового деформування трубчатих зразків, підданих дії знакозмінного розтягу–стиску та кручення за різних розмахів повних деформацій. Усі види геометрій двовісних траєкторій деформування представлено на рис. 1 роботи [9], в якій зазначені експериментальні дані були предметом аналізу. Для скорочення викладок ці геометрії не наводяться.

На відміну від згаданої роботи, де константи матеріалу α і k визначалися шляхом апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів, що не завжди є придатним для інженерної практики, використаємо методики з обмеженою кількістю базових експериментів. Отже, константи матеріалу α і k визначатимемо за формулами (5) і (7), а для порівняння приведемо їх значення, отримані за апроксимаційним методом [9].

Виберемо для кожного конкретного матеріалу за процедурою, викладеною в попередньому розділі, певні значення розмаху деформацій та відповідні їм значення довговічностей. Приймемо їх за базові. Тоді, використовуючи формули (5) і (7), для сталі 304 отримаємо такі значення констант: $\alpha = 0,94$, $k = 0,2$, в той час як апроксимаційна процедура дає наступні величини: $\alpha = 0,9$, $k = 0,44$. Для алюмінієвого сплаву 6061 матимемо відповідно таку пару даних: $\alpha = 0,44$, $k = 0$ і $\alpha = 0,4$, $k = 0$; для чистого алюмінію: $\alpha = 0$, $k = 0$ і $\alpha = -0,1$, $k = 0$; для міді: $\alpha = 0,9$, $k = 0$ і $\alpha = 0,9$, $k = 0$; для сталі 310: $\alpha = 0,84$, $k = 0,55$ і $\alpha = 0,8$, $k = 0,8$.

Легко бачити, що запропонований в даній роботі метод визначення констант матеріалу дає результати, подібні до отриманих при використанні апроксимаційної процедури. Більш близькі результати маємо при визначенні константи α , дещо більша відмінність спостерігається при визначенні константи k .

Важливо пересвідчитися, наскільки ці відмінності вплинуть на характер постульованої нами лінійної залежності малоциклового непропорційного деформування, побудованої в логарифмічних координатах.

Визначимо за формулою (1) приведений розмах деформацій для кожної конкретної траєкторії циклу, що досліджувалася в роботах [12, 13]. Поставимо у відповідність обчисленому приведенному розмаху число циклів до

руйнування. На рис. 2 представлено розподіл експериментальних даних за пропорційного та непропорційного малоциклового деформування із застосуванням моделі (1). Легко пересвідчитися, що для всіх досліджуваних матеріалів використання констант матеріалу, визначених за описаною процедурою, якісно майже не вплинуло на характер розподілу експериментальних точок. Цей розподіл, як і в роботі [9], виявляє чітку тенденцію до лінійної залежності. Розкид експериментальних даних навколо такої залежності підтверджує, що запропоновані методики визначення констант задовольняють точності, яка може вважатися достатньою для інженерної практики. Дві останні обставини дозволяють запропонувати інженерний підхід до прогнозування довговічності для матеріалів, підданих дії двовісного малоциклового деформування.

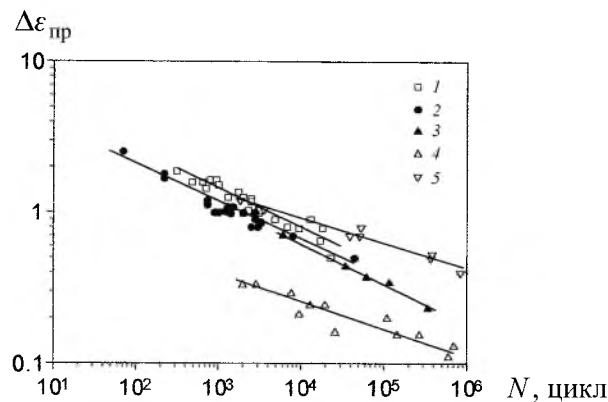


Рис. 2. Експериментальні дані малоциклової втоми сталі 304 (1), алюмінієвого сплаву 6061 (2), міді (3), алюмінію (4) і сталі 310 (5).

Прогнозування довговічності. Використання деформаційного параметра $\Delta\varepsilon_{\text{пр}}$ дозволило “викласти” експериментальні точки, що відповідають непропорційному малоцикловому деформуванню, на пряму малоциклової втоми, яка може бути отримана за результатами експериментів при пропорційному циклічному деформуванні. Зазначимо, що такі прямі малоциклової втоми для багатьох конструкційних матеріалів широко представлені в довідниковій літературі. За цих обставин заслуговує на увагу спроба скористатися зазначеною інформацією для прогнозування довговічності при довільному непропорційному деформуванні. Тоді, згідно з рис. 1, найпростіший вираз для визначення розрахункової довговічності при непропорційному навантажуванні можна представити у вигляді

$$N = \left(\frac{\Delta\varepsilon_{\text{пр}}}{10^B} \right)^{1/n}, \quad (9)$$

де N – число циклів до руйнування; n і B – коефіцієнти лінійної апроксимації експериментальних даних малоциклової втоми за одновісного деформування (n – кутовий коефіцієнт); $\Delta\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений розмах, що визначається за формулою (1).

Скористаємося виразом (9) для теоретичного прогнозування довговічності. Розглянемо циклічні траєкторії, що досліджувалися в роботах [12–15]. Необхідні константи матеріалу α і k моделі (1) стосовно матеріалів, що розглядалися в роботах [12, 13], визначено у попередньому розділі. Для перевірки ефективності критерію (9) збільшимо вибірку досліджуваних матеріалів. Із цією метою проаналізуємо також експериментальні дані непропорційної малоциклової втоми сталей 45 (сім траєкторій) [14] і 316 (п'ять траєкторій) [15]. Для зазначених сталей відповідно отримано наступні константи моделі (1): $\alpha = 0,8$, $k = 0,2$; $\alpha = 0,8$, $k = 0$.

Для кожної конкретної траєкторії циклу визначимо коефіцієнт непропорційності Φ за формулою (3) і кут φ . Враховуючи їх разом із значеннями α і k , знайдемо приведений розмах $\Delta\varepsilon_{пр}$. Коефіцієнти лінійної апроксимації експериментальних даних малоциклової втоми n і B легко знайти за даними тих же одновісних базових експериментів, що були сформульовані при визначенні констант α і k . В таблиці приведено ці коефіцієнти для всіх досліджуваних сталей.

Значення коефіцієнтів лінійної апроксимації даних малоциклової втоми

Матеріал	n	B
Сталь 304	– 0,292	1,025
Алюмінієвий сплав 6061	– 0,242	0,820
Алюміній	– 0,177	0,152
Мідь	– 0,278	0,900
Сталь 310	– 0,200	0,780
Сталь 45	– 0,290	1,070
Сталь 316	– 0,256	0,950

Таким чином, параметри $\Delta\varepsilon_{пр}$, n і B повністю конкретизують інженерний метод визначення довговічності.

Результати прогнозування довговічності розглянутих матеріалів представлено на рис. 3, де по осі ординат відкладено експериментальні значення, по осі абсцис – розрахункові. Майже для всіх матеріалів (окрім алюмінію – рис. 3,в) спостерігається задовільне прогнозування довговічності. Похибка прогнозування співмірна з розкидом експериментальних даних для одних і тих же траєкторій і не перевищує для крайнього випадку 2,5 раза. Наприклад, для сталі 304 розкид даних для деяких траєкторій складає до 120%. Алюміній взагалі може вважатися нетиповим матеріалом, оскільки в залежності від розмаху деформацій пропорційні та непропорційні траєкторії виявляють протилежні тенденції. Так, при рівні розмаху деформацій $\Delta\varepsilon > 0,25\%$ довговічність для непропорційної кругової траєкторії менша, ніж для пропорційної траєкторії. В той же час все змінюється з точністю до навпаки у випадку, коли $\Delta\varepsilon < 0,25\%$. За таких обставин прогнозування довговічності за загальноприйнятими деформаційними чи енергетичними підходами, що базуються на однозначних тенденціях, втрачає сенс. За тих же причин використання запропонованого деформаційного параметра для алюмінію виявилось не досить ефективним (на рис. 2 можна спостерігати найбільший розкид даних), а отже, важко очікувати задовільних результатів при прогнозу-

ванні довговічності. Мабуть, при розгляді таких матеріалів слід залучати підходи, що використовують мікроструктурні параметри матеріалу. Для сталі 316 має місце майже ідеальне прогнозування довговічності (рис. 3,є). Можливо, цьому сприяло те, що прогнозувалися дані малоциклової втоми хоча і для різних непропорційних траєкторій, але лише для одного рівня розмаху деформацій $\Delta\varepsilon$. Ця обставина є прямим свідченням ефективності використання в критеріальних залежностях такого параметра, як коефіцієнт непропорційності циклу.

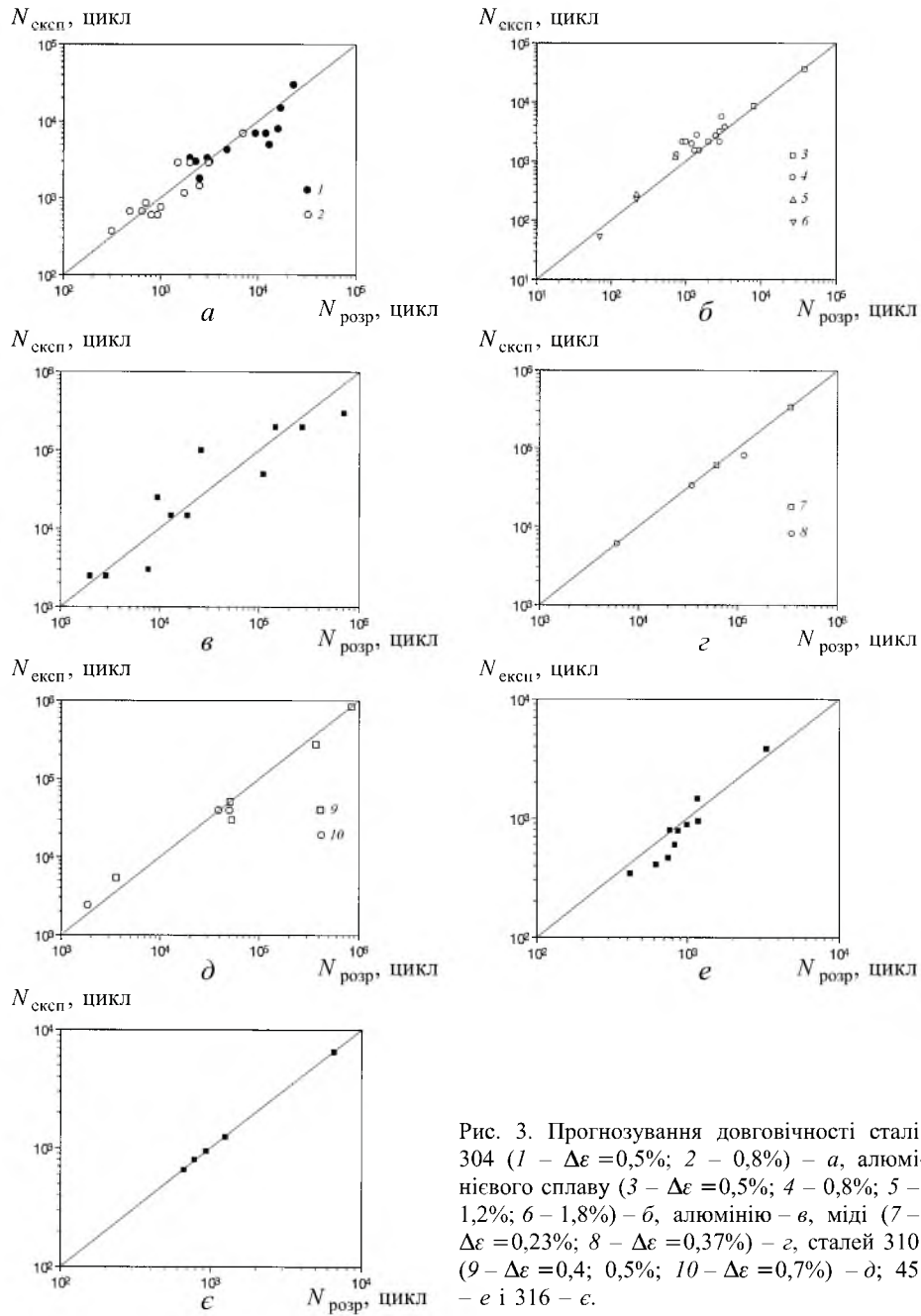


Рис. 3. Прогнозування довговічності сталі 304 (1 – $\Delta\varepsilon = 0,5\%$; 2 – $0,8\%$) – а, алюмінієвого сплаву (3 – $\Delta\varepsilon = 0,5\%$; 4 – $0,8\%$; 5 – $1,2\%$; 6 – $1,8\%$) – б, алюмінію – в, міді (7 – $\Delta\varepsilon = 0,23\%$; 8 – $\Delta\varepsilon = 0,37\%$) – г, сталей 310 (9 – $\Delta\varepsilon = 0,4$; $0,5\%$; 10 – $\Delta\varepsilon = 0,7\%$) – д; 45 – е і 316 – е.

В цілому приведені результати свідчать про цілковиту придатність застосування запропонованого критерію в інженерній практиці.

В и с н о в к и

1. Запропоновано деформаційний параметр, що корелює з довговічністю. Подібно до енергетичних критеріїв цей параметр дозволяє через коефіцієнт непропорційності циклу врахувати характерний лише даній траєкторії рівень деформаційного зміцнення. Як для пропорційного, так і непропорційного деформування в логарифмічних координатах зберігається лінійний характер залежності кривих малоциклової втоми при використанні запропонованого деформаційного параметра.

2. Визначено системи базових експериментів та методики знаходження констант матеріалу для конкретизації деформаційного параметра. Показано, що константи, отримані за обмеженою кількістю базових експериментів, не суттєво відрізняються від отриманих на основі апроксимаційної процедури.

3. Розроблено простий інженерний метод, що дозволяє досить ефективно прогнозувати довговічність матеріалу при двовісному непропорційному деформуванні за малоциклової втоми.

Р е з ю м е

На основе анализа экспериментальных данных малоциклового усталости при одноосном и двухосном (непропорциональном) деформировании широкого класса металлических материалов предложен инженерный подход к оценке долговечности. Подход базируется на корреляционной линейной зависимости между приведенным размахом деформаций и числом циклов до начала разрушения. Указанный деформационный параметр учитывает как ориентацию траектории цикла в пространстве деформаций, так и степень ее непропорциональности. Применение деформационного параметра в качестве критериального позволило получить приемлемые результаты при прогнозировании долговечности.

1. Серенсен С. В., Шнейдерович Р. М., Гусенков А. П. и др. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчета и испытаний. – М.: Наука, 1975. – 286 с.
2. Каталог данных по механическим свойствам и расчетным характеристикам конструкционных материалов в области малоциклового усталости. Проблемы прочности, долговечности и надежности продукции машиностроения. – М.: Ин-т машиноведения, 1990. – 400 с.
3. Garud Y. S. A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings // Trans. ASME J. Engng. Mater. Tech. – 1981. – **103**. – P. 118 – 125.
4. Broun M. W. and Miller K. J. Multiaxial Fatigue. – ASTM STP 853, 1985.
5. Shukaev S. Criteria for limiting condition of metal alloys under biaxial low-cycle fatigue // 5th Int. Conf. Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture. – Cracow (Poland). – 1997. – **I**. – P. 207 – 220.

6. *Tanaka E., Murakami S., and Ooka M.* Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity // *J. Mech. Phys. Sol.* – 1985. – **33**. – P. 559 – 575.
7. *Benallal A. and Marquis D.* An experimental investigation of cyclic hardening of 316 stainless steel under complex multi-axial loadings // *Transaction 9th SMIRT.* – 1987. – **L**. – P. 385 – 393.
8. *McDowell D. L.* Simple experimentally motivated cyclic plasticity model // *J. Engng. Mech.* – 1987. – **113**, No. 3. – P. 387 – 397.
9. *Бородий М. В.* Анализ экспериментальных данных малоциклового усталости при непропорциональном деформировании // *Пробл. прочности.* – 2000. – № 1. – С. 13 – 21.
10. *Бородий М. В.* К вопросу об определении коэффициента непропорциональности цикла // *Там же.* – 1995. – № 5-6. – С. 29 – 38.
11. *Borodii M. V., Kucher N. K., and Strizhalo V. A.* Development of a constitutive model for biaxial low-cycle fatigue // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* – 1996. – **19**, No. 10. – P. 1169 – 1179.
12. *Дунг С., Соси Д., Робертсон И.* Дислокационная субструктура и упрочнение при непропорциональном нагружении // *Современное машиностроение. Сер. Б.* – 1991. – № 4. – С. 32 – 43.
13. *Iton T., Nakata T., Sakane M., and Ohnami M.* Nonproportional low-cycle fatigue of 6061 aluminium alloy under 14 strain paths // *5th Int. Conf. Biaxial /Multiaxial Fatigue and Fracture.* – Cracov (Poland). – 1997. – **I**. – P. 173 – 187.
14. *Chen X., Xu Sh. Y., and Huang D. X.* Critical plane strain energy density criterion of multiaxial low-cycle fatigue life // *Fatigue'99 (Proc. 7th Int. Fatigue Congress).* – Beijing, 1999. – **1**. – P. 959 – 964.
15. *He G. O., Chen Ch. Shu., and Gao Q.* Nonproportional low-cycle fatigue under multiaxial loading for 316L stainless steel // *Fatigue'99 (Proc. 7th Int. Fatigue Congress).* – Beijing, 1999. – **1**. – P. 917 – 922.

Поступила 10. 04. 2000