

Прогнозування деформаційного зміцнення і довговічності циклічно нестабільних матеріалів

М. В. Бородій

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

Проаналізовано дані циклічного деформування матеріалів із різними циклічними властивостями. Встановлено залежність між рівнем додаткового деформаційного зміцнення та механічними характеристиками матеріалу. Запропоновано моделі для врахування впливу виду напруженого стану на деформаційне зміцнення та довговічність за непропорційного циклічного деформування. Моделі побудовано на основі аналізу експериментальних даних циклічного деформування нержавіючої сталі 304. Прогнозування деформаційного зміцнення і довговічності здійснюється за окремого розгляду впливу форми циклу та виду напруженого стану. Для врахування впливу форми циклу використовуються коефіцієнт непропорційності циклу та параметр чутливості до непропорційності, для врахування виду напруженого стану – коефіцієнт виду напруженого стану і відповідний йому параметр чутливості до виду напруженого стану. Результати прогнозування за феноменологічними моделями як деформаційного зміцнення, так і довговічності свідчать про їх достатню ефективність.

Ключові слова: утома, непропорційне деформування, деформаційне зміцнення, коефіцієнт непропорційності циклу, довговічність.

Позначення

- $\Delta\epsilon$ – розмах деформацій циклу
- $\Delta\epsilon_{\text{нпр}}$ – приведений розмах деформацій циклу
- $\Delta\epsilon_1$ – розмах головної деформації в напрямку максимального розмаху деформацій циклу
- $\Delta\epsilon_{1\text{max}}$ – максимально можливий розмах головної деформації
- $\sigma^{\text{нпр}}$ – максимальний рівень деформаційного зміцнення за непропорційного навантажування
- $\sigma^{\text{пр}}$ – максимальний рівень деформаційного зміцнення за пропорційного навантажування
- σ_T – границя текучості матеріалу
- σ_B – границя міцності матеріалу
- φ – мінімальний кут між максимальним розмахом деформацій циклу і напрямком максимально можливої головної деформації
- Φ – коефіцієнт непропорційності циклу
- $L_{\text{сис}}$ – довжина траєкторії циклу
- p – коефіцієнт впливу виду напруженого стану
- α, α_1 – параметри чутливості до непропорційності, визначені за даними зміцнення і довговічності відповідно
- k, k_1 – параметр чутливості матеріалу до виду напруженого стану, визначений за даними зміцнення і довговічності відповідно

n, B – параметри лінійної апроксимації експериментальних даних малоциклової втоми за одновісного розтягу–стиску

N – довговічність

Вступ. Для циклічно нестабільних матеріалів при малоцикловому навантажуванні з контролем за деформацією (жорсткий режим) є характерним деформаційне зміцнення або знеміцнення. Раніше було показано [1], що до цієї групи матеріалів відносяться матеріали, для яких відношення границі текучості до границі міцності менше 0,75, що є характерним для більшості конструктивних сталей і сплавів. Якщо деформування відбувається за непропорційних циклів, то для таких матеріалів деформаційне зміцнення може збільшуватися в декілька разів або навіть на порядок у порівнянні з пропорційним циклічним деформуванням за однакового рівня амплітуди деформацій. Більш високий рівень напружень однозначно призводить до зменшення довговічності матеріалу.

Цикли деформування, що виникають в елементарних об'ємах під час циклічного навантажування, можуть мати різну форму в залежності від геометрії конструкції та характеру прикладених зовнішніх навантажень. Кожній формі циклу відповідає певний ступінь непропорційності. Для експериментального вивчення ефектів, пов'язаних із впливом форми циклу деформування (непропорційності) на деформаційне зміцнення та довговічність, здебільшого проводять випробування тонкостінних трубчатих зразків, що піддаються одночасній дії розтягу–стиску та знакозмінного кручення за певними програмами [2, 3]. На основі результатів експериментів пропонуються феноменологічні моделі урахування деформаційного зміцнення для прогнозування кінетики пружно-пластичного деформування в рамках розробки моделей циклічної пластичності [4–7] або довговічності [8, 9].

Виконаний раніше [10] порівняльний аналіз застосування різних підходів до прогнозування додаткового деформаційного зміцнення за непропорційного деформування по регулярних (замкнені) циклічних траєкторіях показав, що важливою умовою коректного прогнозування рівнів зміцнення є врахування в моделях як форми траєкторії циклу, так і напруженого стану, за яким цей цикл реалізується. Запропонований автором підхід [11] є високо-ефективним для матеріалів, що нечутливі до виду напруженого стану. Проте, якщо матеріал не задовольняє останньому положенню, то для окремих циклічних траєкторій можуть мати місце значні розбіжності між експериментальними значеннями і результатами прогнозування. Це й призвело до пошуку більш досконалого підходу щодо прогнозування деформаційного зміцнення за непропорційних циклів. Таким чином, основною метою роботи є розробка експериментально обґрунтованих феноменологічних моделей прогнозування деформаційного зміцнення та удосконалення моделей прогнозування довговічності, в яких фактор додаткового деформаційного зміцнення за непропорційного деформування відіграє вирішальну роль.

Деформаційне зміцнення. Чутливість матеріалів до додаткового деформаційного зміцнення може бути визначена на основі аналізу основних механічних характеристик: границі текучості і границі міцності. Можливість такої кореляції проаналізована раніше [1]. У результаті аналізу механічних ха-

рактеристик 11 різних металевих матеріалів (сталі: X16H9M2 [12], 08X18H10T [13], 45 [14], SS304 [8], SS310 [15], SS316 [2], SS316L [16], SNCM630 [17] та сплави: 800H [18], BT9 [13], Al6061 [8]) отримана лінійна залежність між безрозмірними параметрами β і α , що характеризують відповідно деформаційне зміцнення за статичного деформування та додаткове деформаційне зміцнення за непропорційного циклічного деформування (рис. 1). Параметри β і α визначаються наступним чином:

$$\beta = \sigma_{\text{в}} / \sigma_{\text{т}} - 1; \quad (1)$$

$$\alpha = \sigma^{\text{нпр}} / \sigma^{\text{пр}} - 1. \quad (2)$$

Максимальний ступінь додаткового деформаційного зміцнення визначається через відношення максимального напруження $\sigma^{\text{нпр}}$ для непропорційної траєкторії у вигляді кола (на рис. 2 траєкторія з постійним значенням інтенсивності деформації, цикл № 13) до максимальних напружень $\sigma^{\text{пр}}$ для пропорційної циклічної траєкторії, яка відповідає одновісному розтягу-стиску (на рис. 2 нульовий цикл). Емпіричну лінійну залежність можна отримати лише за апроксимації експериментальних даних, представлених у напівлогарифмічних координатах. Лінійне рівняння регресії для визначення додаткового деформаційного зміцнення в залежності від статичного зміцнення має наступний вигляд:

$$\lg \alpha = 0,705\beta + 1,22. \quad (3)$$

До циклічно нестабільних матеріалів можна віднести матеріали, для яких $\sigma_{\text{в}} / \sigma_{\text{т}} > 30\%$. Це, наприклад, нержавіюча сталь 304, експериментальні дані деформування якої по 13 циклічних траєкторіях № 0–12 [8] (рис. 2) будуть використані для подальшого аналізу. На рис. 2 пари траєкторій № 1 і 2 та № 3 і 4 відрізняються способом їх реалізації [8]. Пари № 1 і 3 та № 2 і 4 є подібними за способом їх реалізації, але повернуті по відношенню одна до одної. Для цієї сталі ступінь максимального додаткового деформаційного зміцнення α є досить високим і складає за даними роботи [8] приблизно 90%. У той же час відповідне значення ступеня зміцнення за статичною діаграмою β дорівнює 165%. Ці дані добре узгоджуються з рівнянням (3).

Експериментальні дані [8] свідчать, що на рівень деформаційного зміцнення сталі 304 значно впливають як форма траєкторії циклу, так і вид напруженого стану, за якого реалізується цикл деформування. Для ілюстрації впливу виду напруженого стану на деформаційне зміцнення в табл. 1 представлено значення відношень максимальних напружень для подібних пар циклічних траєкторій, що по-різному орієнтовані (повернуті між собою на кут 45°) у просторі повних деформацій, для двох рівнів розмаху деформацій. Значення деформаційного зміцнення відрізняються приблизно на 25%, причому достатньо близькі значення спостерігаються як для різних геометрій циклів (пропорційних і непропорційних), так і для різних розмахів деформацій. Це може бути враховано при побудові аналітичної моделі, для

якої при конкретизації параметрів буде достатньо проведення базових експериментів лише за одновісного циклічного деформування, наприклад розтягу–стиску.

Т а б л и ц я 1

Вплив виду напруженого стану на деформаційне зміцнення матеріалу

№ траекторій		σ^0 / σ^{45}	
0 град	45 град	$\Delta\varepsilon = 0,5\%$	$\Delta\varepsilon = 0,8\%$
0	5	0,88	0,82
1	3	0,78	0,74
2	4	0,76	0,78
12	10	0,74	0,82

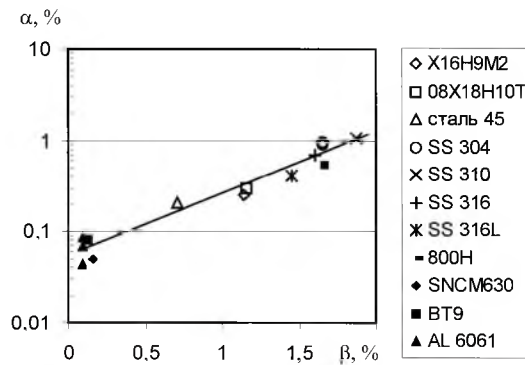


Рис. 1. Залежність між деформаційним зміцненням за статичного і циклічного деформування для різних матеріалів.

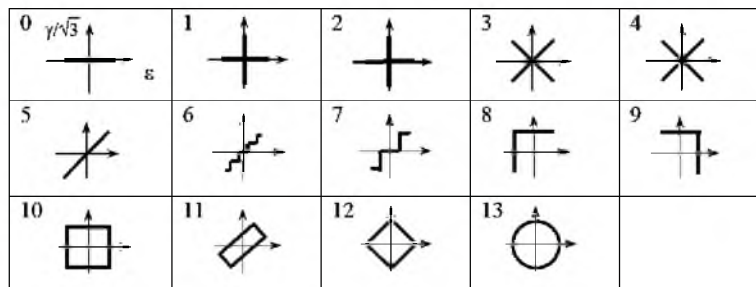


Рис. 2. Траекторії циклічного деформування.

Прогнозування деформаційного зміцнення. За базовий будемо використовувати підхід [10]. Його суть полягає у застосуванні коефіцієнта непропорційності циклу Φ [11] для прогнозування деформаційного зміцнення матеріалу при деформуванні по довільних замкнених циклічних траекторіях. Коефіцієнт непропорційності циклу побудований таким чином, що дозволяє однозначно характеризувати форму циклу і встановити лінійну залежність між геометрією циклу і деформаційним зміцненням. Його аналітичний запис наступний:

$$\Phi = (S'_{cyc}/S_0)^k, \quad (4)$$

де

$$k = (1 - S_{cyc}/S_0) \frac{L_{cyc}}{4\Delta r_{max}}; \quad S_0 = \frac{1}{2} \oint_{L_0} r \times dr; \quad S'_{cyc} = \frac{1}{2} \oint_{L'_{cyc}} r \times dr. \quad (5)$$

Не зупиняючись на розшифруванні деяких позначень у (4) і (5), які в повній мірі наведено в [10], зазначимо, що їх зміст стає зрозумілим, якщо виходити з фізичного змісту коефіцієнта непропорційності (4). Він полягає у відношенні площ, що охоплюють плоскі циклічні траєкторії. У першому виразі (5) в дужках чисельник – це площа, яку охоплює поточна траєкторія циклу S_{cyc} , знаменник – площа S_0 описаної навколо неї кругової траєкторії (на рис. 2 цикл № 13). Показник степеня k залежить від цього відношення, а також від відносної довжини траєкторії циклу $\frac{L_{cyc}}{4\Delta r_{max}}$ (Δr_{max} – максимальний розмах деформацій циклу).

Рівень максимальних напружень у стані стабілізації циклічних властивостей матеріалу для довільної плоскої циклічної траєкторії визначається з наступної лінійної залежності:

$$\sigma(\Phi) = [\sigma^{нпр} - \sigma^{пр}] \Phi + \sigma^{пр}, \quad (6)$$

де $\sigma^{пр}$, $\sigma^{нпр}$ – базові величини.

Очевидно, що найбільшою проблемою при застосуванні подібних моделей є отримання значення $\sigma^{нпр}$. Якщо проведення одновісних випробувань на втому, з яких можна визначити рівень максимальних напружень $\sigma^{пр}$, не викликає труднощів і результати таких експериментів для багатьох матеріалів добре представлені в науковій літературі, то дані про деформування та рівень зміцнення $\sigma^{нпр}$ за непропорційних циклів (на рис. 2 цикл № 13) через значну вартість експериментальних робіт є обмеженими. Щоб розв'язати цю проблему, можна скористатися запропонованою вище емпіричною залежністю (3), що дозволяє з певним наближенням (з інженерною точністю) прогнозувати максимальні рівні деформаційного зміцнення на основі даних статичної діаграми деформування та циклічної діаграми за одновісного деформування. Тоді шукане значення $\sigma^{нпр}$ можна визначити з рівняння (2):

$$\sigma^{нпр} = (1 + \alpha) \sigma^{пр}, \quad (7)$$

де α визначається з (3).

Аналогічно [8] введемо параметр, що характеризує чутливість матеріалу до непропорційності. У нашому випадку він збігається з параметром α , що визначається виразом (2). Для сталі 304 параметр чутливості $\alpha = 0,9$, оскільки ступінь додаткового деформаційного зміцнення складає 90%.

З урахуванням (7) залежність для визначення додаткового зміцнення (6) можна записати наступним чином:

$$\sigma(\Phi) = (1 + \alpha\Phi)\sigma^{\text{пр}}. \quad (8)$$

В табл. 2 в 5 і 8 стовпчиках представлено результати прогнозування деформаційного зміцнення сталі 304 з використанням залежності (6), в 4 і 7 стовпчиках – відповідні їм експериментальні значення. На відміну від [10], де прогнозувалося деформаційне зміцнення цієї сталі через визначення максимального значення головного напруження циклу, у даній роботі прогнозуються максимальні рівні еквівалентних напружень за Мізесом.

Т а б л и ц я 2

Прогнозування деформаційного зміцнення

№ траекторії	Φ	p	Δε = 0,5%			Δε = 0,8%		
			σ, МПа	σ, МПа (6)	σ, МПа (11)	σ, МПа	σ, МПа (6)	σ, МПа (11)
0	0	0,8267	265	265	265	315	315	315
1	0,6366	0,8267	366	417	361	467	495	430
2	0,6366	0,8267	341	417	361	442	495	430
3	0,6366	1,0	467	417	437	631	495	520
4	0,6366	1,0	448	417	437	565	495	520
5	0	1,0	300	265	320	380	315	381
6	0,248	1,0	335	324	366	385	385	435
7	0,363	1,0	330	352	387	418	418	460
8	0,576	1,0	505	402	426	568	478	506
9	0,576	1,0	470	402	426	580	478	506
10	0,89	1,0	475	477	483	600	567	574
11	0,6828	0,96	309	428	427	473	560	508
12	0,89	0,8267	353	477	400	495	508	475
13*	1,0	1,0	504	504	504	600	600	600
Середня похибка прогнозування δ, %			13,1	9,3	–	9,1	7,1	

Примітка. Зірочкою позначено траекторію, для якої значення отримано на основі прогнозування.

Як зазначалося вище, для досліджуваного матеріалу важливе значення має орієнтація траекторії по відношенню до головних осей деформування (у нашому випадку – ε, γ√3), що виражається у значній відмінності значень деформаційного зміцнення (до 25%) для подібних траекторій. Модель (6) або (8) не враховує цю обставину. Для побудови більш досконалої моделі слід визначитися з параметром, що може характеризувати вплив виду напруженого стану на деформаційне зміцнення. У роботі [8] за такий параметр в опосередкованій формі (у запису коефіцієнта непропорційності циклу)

прийнято абсолютне значення максимального розмаху головної деформації циклу $|\Delta\varepsilon_{1,3}|$. Хоча в згаданій роботі вибір цієї величини не обґрунтовується, можна навести деякі експериментальні дані на користь такого вибору. Так, при циклічному деформуванні за однакового значення інтенсивності деформацій за Мізесом відношення головної деформації при крученні $\varepsilon_1^{\text{кр}}/\varepsilon_1^{\text{роз}}$ до головної деформації при розтязі сягає 0,866, у той час як відношення максимальних рівнів напружень $\sigma^{\text{кр}}/\sigma^{\text{роз}}$, що відповідають цим деформаціям, для досить різних матеріалів, наприклад сталей 03Х21Н32МЗБ, 316 та титанового сплаву ВТ9, приблизно дорівнює 0,9. Наведені результати є достатньо близькими. З урахуванням цього в якості характеристики виду напруженого стану будемо використовувати також параметр $|\Delta\varepsilon_{1,3}|$.

Оскільки форма циклу і вид напруженого стану можуть впливати на матеріал незалежно один від одного, що підтверджується експериментально, реальна його поведінка може характеризуватися чотирма випадками їх можливих комбінацій (обидва фактори або присутні, або відсутні, присутній або лише перший, або лише другий). У зв'язку з цим вплив зазначених факторів слід розглядати окремо.

Для урахування впливу на деформаційне зміцнення виду напруженого стану розглянемо подібно до коефіцієнта Φ коефіцієнт впливу виду напруженого стану p як ще одну змінну в моделі (7):

$$p = 1 - k(1 - \Delta\varepsilon_1/\Delta\varepsilon_{1\text{max}} \cos \varphi), \quad (9)$$

де k – параметр чутливості матеріалу до виду напруженого стану (при $k = 0$ матеріал нечутливий до виду напруженого стану); φ – мінімальний кут між напрямком максимальної головної деформації циклу і напрямком максимально можливої головної деформації ($0 \leq \varphi \leq \pi/4$).

Напрямок максимально можливої головної деформації циклу в просторі $\varepsilon - \gamma\sqrt{3}$ складає приблизно кут $\pm 45^\circ$ до осі ε . На рис. 3 представлено схему визначення параметрів у виразі (9). Значення коефіцієнта p для траєкторій циклу, що розглядаються в даній роботі, наведено в табл. 2. Якщо напрямок головної деформації циклу збігається з напрямком максимально можливої головної деформації, то $p = 1$.

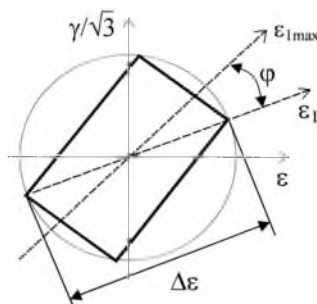


Рис. 3. Схема визначення параметрів, що входять у вираз для коефіцієнта p .

Параметр матеріалу k можна визначити з аналізу ступеня деформаційного зміцнення двох пропорційних траєкторій (в табл. 1 № 0 і 5). Тоді з урахуванням (9) вираз для визначення параметра k матиме наступний вигляд:

$$k = \left(1 - \frac{\sigma^{(0)}}{\sigma^{(5)}}\right) / \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta \varepsilon_1^{(0)}}{\Delta \varepsilon_1^{(5)}}\right). \quad (10)$$

Тут і далі цифрами в дужках позначено номер траєкторії згідно з прийнятою на рис. 2 нумерацією. Для сталі 304 величина $k = 0,52$.

З урахуванням параметра p вираз для прогнозування деформаційного зміцнення (8) може бути записаний так:

$$\sigma(\Phi, p) = \{1 + [(1 + \alpha)p^{(0)} - 1]\Phi\} \frac{p}{p^{(0)}} \sigma^{\text{пр}}. \quad (11)$$

Необхідність введення нормівного множника $p^{(0)}$ зумовлена тим, що в якості базового значення деформаційного зміцнення за пропорційного деформування приймалися як найбільш доступні напруження за розтяг-стиску $\sigma^{\text{пр}} = \sigma^{(0)}$, в той час як для коректного прогнозування повинно використовуватися $\sigma^{\text{пр}} = \sigma^{(5)}$. Якщо останнє значення деформаційного зміцнення використовувати як базове, то множник $p^{(0)}$ в рівнянні (11) слід опустити.

Було виконано прогнозування деформаційного зміцнення за моделлю (11), його результати представлено в табл. 2. Порівняно з попередньою моделлю отримано кращі результати, про що свідчить зменшення за абсолютним значенням середньої похибки прогнозування.

Прогнозування довговічності. Раніше [19] було запропоновано деформаційний підхід до прогнозування довговічності за непропорційних циклів, де ключовим параметром служить приведений розмах деформацій $\Delta \varepsilon_{\text{нпр}}$:

$$\Delta \varepsilon_{\text{нпр}} = (1 + \alpha_1 \Phi)(1 + k_1 \sin \varphi) \Delta \varepsilon. \quad (12)$$

У цій моделі параметри чутливості матеріалу до непропорційності α_1 і виду напруженого стану k_1 визначали з базових експериментів на малоциклово втому, тобто використовували значення довговічностей:

$$k_1 = \frac{1}{\sin \varphi} \left[\left(\frac{\bar{N}^{(5)}}{N^{(0)}} \right)^n - 1 \right]; \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\Phi^{(13)}} \left[\left(\frac{\bar{N}^{(13)}}{N^{(0)}} \right)^n - 1 \right], \quad (14)$$

де показник степеня n дорівнює нахилу базової прямої малоциклової утоми (крива утоми в логарифмічних координатах) за одновісного деформування розтягом–стиском; $\bar{N}^{(5)}$, $\bar{N}^{(13)}$, $N^{(0)}$ – відповідно експериментальні значення довговічностей для вказаних у дужках типів траєкторій циклу за однакового значення розмаху деформацій.

Скористаємося новою моделлю (9) для врахування впливу виду напруженого стану при визначенні приведенного розмаху деформацій $\Delta\varepsilon_{\text{нпр}}$. Тоді вираз у других дужках рівняння (12) необхідно замінити множителем, що містить коефіцієнт впливу виду напруженого стану p :

$$\Delta\varepsilon_{\text{нпр}}(\Phi, p) = (1 + \alpha_1 \Phi) \frac{p}{p^{(0)}} \Delta\varepsilon. \quad (15)$$

На основі (15) і (9) параметр чутливості матеріалу до виду напруженого стану k_1 , який потрібно використовувати при визначенні коефіцієнта p , буде мати наступний вигляд:

$$k_1 = \left(1 - \left(\frac{N^{(0)}}{N^{(5)}} \right)^n \right) / \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta\varepsilon_1^{(0)}}{\Delta\varepsilon_1^{(5)}} \right). \quad (16)$$

Вираз для визначення параметра k_1 (16) подібний до виразу для параметра k (10) з тією лише різницею, що в (10) використовуються експериментальні дані базових експериментів відносно деформаційного зміцнення, а в (16) – відносно довговічностей. Проаналізуємо можливість використання параметра k для прогнозування не лише зміцнення, але й довговічності. Для цього не обов'язково розраховувати відповідні коефіцієнти, а досить порівняти між собою відношення $\sigma^{(0)}/\sigma^{(5)}$ і $(N^{(0)}/N^{(5)})^n$. Аналіз експериментальних даних [8], наприклад результатів деформування з розмахом деформацій $\Delta\varepsilon = 0,8\%$, для яких $\sigma^{(0)} = 315$ МПа, $\sigma^{(5)} = 380$ МПа (табл. 3), $N^{(0)} = 7100$ цикл, $N^{(5)} = 3200$ цикл (табл. 3), а також визначення нахилу прямої малоциклової утоми за даними пропорційного деформування розтягом–стиском ($n = -0,244$) дозволять отримати: $\sigma^{(0)}/\sigma^{(5)} = 0,829$ і $(N^{(0)}/N^{(5)})^n = 0,823$. Таким чином, можемо зробити важливий висновок: параметр чутливості до виду напруженого стану при прогнозуванні довговічності можна визначати на основі даних деформаційного зміцнення, тобто $k_1 \approx k$.

За новою моделлю (15) параметр чутливості до непропорційності α_1 , визначений за даними довговічності, може бути отриманий аналогічно (14):

$$\alpha_1 = \frac{1}{\Phi^{(13)}} \left[\left(\frac{\bar{N}^{(13)}}{N^{(0)}} \right)^n \frac{p^{(0)}}{p} - 1 \right]. \quad (17)$$

Т а б л и ц я 3

Прогнозування довговічності для сталі 304

№ траєкторії	$\Delta\varepsilon = 0,5\%$			$\Delta\varepsilon = 0,8\%$		
	$\Delta\varepsilon_{\text{нпр}}, \%$	$N_{\text{експ}},$ цикл	$N_{\text{розр}},$ цикл (18)	$\Delta\varepsilon_{\text{нпр}}, \%$	$N_{\text{експ}},$ цикл	$N_{\text{розр}},$ цикл (18)
0	0,5	49000	48367	0,8	7100	7050
1	0,786	9500	7557	1,258	1400	1100
2	0,786	20000	7557	1,258	2100	1100
3	0,951	2400	3464	1,522	820	505
4	0,951	3400	3464	1,522	900	505
5	0,605	17500	22170	0,968	3200	3230
6	0,74	9700	9708	1,184	2600	1415
7	0,802	13000	6960	1,284	1700	1014
8	0,918	2050	4002	1,47	470	583
9	0,918	2950	4002	1,47	660	583
10	1,089	2600	1990	1,743	320	290
11	0,937	14400	3680	1,5	1200	536
12	0,9	4750	4340	1,44	710	632
13*	1,15	–	1600	1,838	–	233

Примітка. Зірочкою позначено кругову траєкторію, для якої експериментальні дані відсутні.

Підставимо в (17) відповідні експериментальні дані (за відсутності інформації про деформування по круговій траєкторії № 13 можна скористатися даними для траєкторії № 10 на рис. 2), і для розмаху $\Delta\varepsilon = 0,8\%$ отримаємо значення коефіцієнта $\alpha_1 = 0,86$. Порівняння останнього з коефіцієнтом, що визначений за даними деформаційного зміцнення ($\alpha = 0,9$) з урахуванням певного розкиду експериментальних даних, особливо щодо довговічності, дозволяє, як і в попередньому випадку, припустити, що $\alpha_1 \approx \alpha$. Визначення параметрів матеріалу за результатами лише деформаційного зміцнення, очевидно, не завжди є коректним. На наш погляд, такий підхід може бути застосований в першу чергу для сильно зміцнених матеріалів, для яких параметр $\beta > 0,7$.

Деформаційний параметр (15) був використаний для аналізу експериментальних даних малоциклової утоми при деформуванні за непропорційними траєкторіями № 1–12 (рис. 2). Параметри матеріалу визначалися на основі експериментальних даних щодо деформаційного зміцнення за пропорційного деформування. На рис. 4 представлено залежність між деформаційним параметром $\Delta\varepsilon_{\text{нпр}}$ та відповідними даними довговічності [8]. Результати не поступаються отриманим за моделлю [12], однак у даному випадку мав місце більш простий спосіб конкретизації параметрів матеріалу. Цей спосіб не вимагає проведення експериментів на утому до руйнування, оскільки досить деформування до стану стабілізації циклічних властивостей матеріалу, тобто в діапазоні 10...50 циклів, а також експериментів за непропорційного деформування.

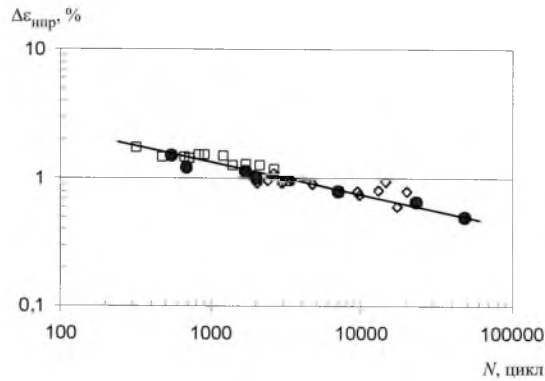


Рис. 4. Кореляція між параметром $\Delta\varepsilon_{\text{нпр}}$ і довговічністю. (Тут і на рис. 5: \diamond – 0,5%; \square – 0,8%; \bullet – нульовий цикл.)

За допомогою деформаційного параметра (15) прогнозування довговічності можна здійснювати за модифікованим деформаційним критерієм Коффіна–Менсона:

$$N = \left(\frac{\Delta\varepsilon_{\text{нпр}}}{10^B} \right)^{1/n} \quad (18)$$

На рис. 5 представлено результати прогнозування довговічності для циклів розтягу–стиску (темні точки) і непропорційних циклів (світлі точки), а у табл. 3 наведено відповідні значення довговічності для сталі 304 для двох розмахів деформацій циклу. Спостерігаються задовільні результати прогнозування, причому у більшості випадків має місце консервативна оцінка. Очевидно, що запропонований метод може використовуватися в інженерній практиці для прогнозування довговічності в малоцикловій області.

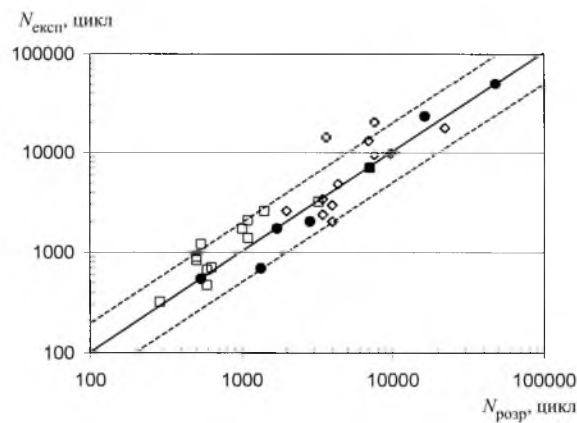


Рис. 5. Прогнозування довговічності.

Висновки

1. Запропоновано метод визначення максимальних рівнів циклічного деформаційного зміцнення під час непропорційного деформування матеріалів за даними статичної діаграми деформування.

2. Розроблено підхід до прогнозування деформаційного зміцнення з урахуванням форми циклу деформування і виду напруженого стану, за яким цей цикл реалізується.

3. Удосконалено деформаційний параметр, що використовується в моделі прогнозування довговічності. Спрощено процедуру визначення констант матеріалу, що фігурують у моделі, за рахунок використання параметрів матеріалу, які отримано на основі даних про деформаційне зміцнення.

Резюме

Проанализированы данные циклического деформирования материалов с разными циклическими свойствами. Установлена зависимость между уровнем дополнительного циклического упрочнения и механическими характеристиками материала. Предложены модели для учета влияния вида напряженного состояния на деформационное упрочнение и долговечность при непропорциональном циклическом деформировании. Модели построены на основе анализа экспериментальных данных циклического деформирования нержавеющей стали 304. Прогнозирование деформационного упрочнения и долговечности осуществляется при отдельном рассмотрении влияния формы цикла и вида напряженного состояния. Для учета влияния формы цикла используются коэффициент непропорциональности цикла и параметр чувствительности к непропорциональности, для учета вида напряженного состояния – коэффициент вида напряженного состояния и соответствующий ему параметр чувствительности к виду напряженного состояния. Результаты прогнозирования с использованием феноменологических моделей как деформационного упрочнения, так и долговечности свидетельствуют о их достаточной эффективности.

1. *Бородій М. В., Стрижало В. О.* Порівняльний аналіз використання параметрів непропорційності для двовісного циклічного деформування // Вісн. НТУУ України “КПІ”. Сер. Машинобудування. – 2003. – № 3. – С. 16 – 18.
2. *Tanaka E., Murakami S., and Ooka M.* Effects of strain path shapes on non-proportional cyclic plasticity // *J. Mech. Phys. Sol.* – 1985. – **33**. – P. 559 – 575.
3. *Benallal A. and Marquis D.* An experimental investigation of cyclic hardening of 316 stainless steel under complex multi-axial loadings // *Trans. 9th SMIRT*. – 1987. – **50**. – P. 385 – 393.
4. *McDowell D. L.* Simple experimentally motivated cyclic plasticity model // *J. Eng. Mech.* – 1987. – **113**, No. 3. – P. 387 – 397.
5. *Беналал А., Марки Д.* Определяющие уравнения упруговязкопластичности для непропорционального циклического нагружения // *Теорет. основы инж. расчетов*. – 1988. – № 3. – С. 68 – 76.
6. *Trampezynski W. and Mroz Z.* Anisotropic hardening model and its application to cyclic loading // *Int. J. Plasticity*. – 1992. – **8**. – P. 925 – 946.

7. Borodii M. V., Kucher N. K., and Strizhalo V. A. Development of a constitutive model for biaxial low-cycle fatigue // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1996. – **19**, No. 10. – P. 1169 – 1179.
8. Iton T., Nakata T., Sakane M., and Ohnami M. Nonproportional low cycle fatigue of 6061 aluminium alloy under 14 strain paths // *Multiaxial Fatigue and Fracture (Elsevier International Series on Structural Integrity)*. – 1999. – **25**. – P. 41 – 54.
9. Shukayev S. N. and Borodii M. V. Low-cycle fatigue strain criterion for biaxial nonproportional loading // *Arch. Mech. Eng.* – 2001. – **68**, No. 1. – P. 7 – 18.
10. Бородій М. В. Ефективність використання коефіцієнтів непропорційності циклу при визначенні деформаційного зміцнення // *Пробл. прочності.* – 2001. – № 6. – С. 84 – 95.
11. Бородій М. В. К вопросу об определении коэффициента непропорциональности цикла // *Там же.* – 1995. – № 5-6. – С. 29 – 38.
12. Kazantsev A. G. and Makhutov N. A. Low-cycle fatigue of anisotropic steel under nonproportional loading // *5th Int. Conf. Biaxial/Multiaxial Fatigue Fracture (Cracow, 12 Sept.)*. – 1997. – **1**. – P. 125 – 139.
13. Shukayev S. N. Criteria for limiting condition of metal alloy under biaxial low-cycle fatigue // *5th Int. Conf. Biaxial/Multiaxial Fatigue Fracture (Cracow, 12 Sept.)*. – 1997. – **1**. – P. 207 – 220.
14. Chen X., Xu Sh. Y., and Hung D. X. Critical plane-strain energy density criterion of multiaxial low-cycle fatigue life // *7th Int. Fatigue Cong. (Beijing, China, 1999)*. – 1999. – **1**. – P. 959 – 964.
15. Дунг С., Сосу Д., Робертсон И. Дислокационная субструктура и упрочнение при непропорциональном нагружении // *Сов. машиностроение. Сер. Б.* – 1991. – № 4. – С. 32 – 43.
16. He G. O., Chen Ch. Shu., and Gao Q. Non-proportional low cycle fatigue under multiaxial loading for 316L stainless steel // *7th Int. Fatigue Cong. (Beijing, China, 1999)*. – 1999. – **1**. – P. 917 – 922.
17. Han C., Chen X., and Kim K. S. Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading // *Int. J. Fatigue.* – 2002. – **24**. – P. 913 – 922.
18. Portella P. D. and Osterle W. Mechanical behavior and microstructural evaluation of alloy 800H under biaxial cyclic loading // *7th Int. Fatigue Cong. (Beijing, China, 1999)*. – 1999. – **2**. – P. 911 – 916.
19. Бородій М. В., Стрижало В. А. Анализ экспериментальных данных малоциклового усталости при непропорциональном деформировании // *Пробл. прочності.* – 2000. – № 1. – С. 13 – 21.

Поступила 05. 02. 2004