

ОЦІНКА ДОВГОВІЧНОСТІ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ДВОВІСНОГО МАЛОЦИКЛОВОГО БЛОКОВОГО НАВАНТАЖУВАННЯ

Рассмотрен вариант метода оценки усталостной долговечности металлических сплавов в условиях многоосного малоциклового блочного нагружения, параметры которого определяются из стандартных испытаний на растяжение-сжатие и знакопеременное кручение. Данный подход не требует экспериментальных данных на многоосную усталость, а именно, по траекториям непропорционального деформирования. Результаты расчета по предложенному методу проверялись на экспериментальных результатах, полученных на образцах из титанового сплава VT1-0 и нержавеющей стали 304SS. Анализ экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о высокой точности оценок долговечностей, получаемых при использовании данного метода.

The variant of method of estimation of fatigue life of metallic alloys is considered in the conditions of multiaxial low-cycle block loading the parameters of which are determined from standard tests on a tension-compression and alternating torsion. This approach does not require experimental information on a low-cycle loading, namely, on the trajectories of disproportionate deformation. The results of calculation on the offered method were checked up on experimental results, got on standards from the titanic alloy of VT1-0 and stainless steel of 304SS. The analysis of experimental and calculation data testifies to high exactness of estimations of fatigue life, got at the use of this method.

Вступ

Багато конструкцій, таких як трубопроводи хімічного та енергетичного обладнання, сосуди високого тиску, елементи авіаційної і космічної техніки та ін., потребують проведення розрахунку на малоциклову втому. Як правило, в процесі експлуатації вони зазнають складних режимів навантажування, параметри яких змінюються у часі. Оцінка втомної довговічності конструкційних матеріалів у таких умовах є складною задачею, адже необхідно одночасно враховувати багато чинників, зокрема вид напруженого стану, непропорційність траєкторії деформування у циклі, нерегулярність навантажування.

Існуючі методи не в повній мірі описують ефекти, які супроводжують нерегулярне багатовісне малоциклове навантажування, що у багатьох випадках призводить до суттєвих похибок у розрахунках. Недостатня вивченість поведінки матеріалів за умови одночасного впливу нерегулярності та непропорційності навантажування пов'язана з обмеженою кількістю експериментальних досліджень за даним напрямком, що зумовлено складністю проведення таких випробувань.

Удосконалення та розробка нових розрахунково-експериментальних методів оцінювання втомної довговічності металевих сплавів та елементів конструкцій в умовах нерегулярного багатовісного малоциклового навантажування є актуальною проблемою сучасної механіки деформівного твердого тіла і становить значний науковий і практичний інтерес. Впровадження таких методів у практику проектування конструкцій та деталей машин дозволить підвищити безпеку їх експлуатації, забезпечить покращення економічних показників.

Метою даної роботи є розвиток методу оцінювання втомної довговічності металевих сплавів за двовісного малоциклового блокового навантажування, що запропонована в роботі [1].

Результати теоретичних досліджень.

За базову критеріальну модель оцінювання граничного стану в умовах багатовісного малоциклового навантажування обрано деформаційну модель, розроблену групою японських вчених Іто–Сакане–Онамі–Сосі [2] та модифіковану Гладським і Шукаєвим [3].

Згідно з цією моделлю амплітуда еквівалентної деформації при непропорційному навантажуванні ε_{NP} визначається за формулою

$$\varepsilon_{NP} = \frac{\Delta\varepsilon_{NP}}{2} = (1 + \eta f_{NP}) \frac{\Delta\varepsilon_{PL}}{2}. \quad (1)$$

Розглянемо складові, що входять до виразу (1).

1) η – коефіцієнт чутливості матеріалу до непропорційності навантажування, який визначається експериментально з випробувань на малоциклову втому за пропорційними та непропорційними траєкторіями деформування.

2) f_{NP} – параметр непропорційності циклу деформування, запропонований в роботі [5]. Параметр залежить лише від історії змінювання головних деформацій і записується так

$$f_{NP} = \frac{1.57}{T \cdot \varepsilon_{Imax}} \cdot \int_0^T (|\sin \xi(t)| \cdot \varepsilon_I(t)) \cdot dt, \quad (2)$$

де $\varepsilon_I(t)$ – максимальна абсолютна величина головної деформації в момент часу t , яка визначається з рівняння:

$$\varepsilon_I(t) = \begin{cases} |\varepsilon_1(t)| & \text{при } |\varepsilon_1(t)| \geq |\varepsilon_3(t)| \\ |\varepsilon_3(t)| & \text{при } |\varepsilon_1(t)| < |\varepsilon_3(t)| \end{cases}, \quad \varepsilon_{Imax} = \max[\varepsilon_I(t)]$$

$\varepsilon_1(t), \varepsilon_3(t)$ – значення максимальної і мінімальної головних деформацій у момент часу t , відповідно; T – тривалість циклу; $\xi(t)$ – кут між напрямками ε_{Imax} та $\varepsilon_I(t)$;

3) $\Delta\varepsilon_{PL}$ – розмах еквівалентної деформації типу Писаренка–Лебедева, яка розраховується за формулою

$$\varepsilon_{PL} = \chi_\varepsilon \cdot \varepsilon_M + (1 - \chi_\varepsilon) \cdot \varepsilon_R, \quad (3)$$

де $\chi_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}-1} \left[2(1 + \nu^*) \left(\frac{\varepsilon_{fs}}{\gamma_{fs}} \right) - 1 \right]$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – величини головних деформацій,

ν^* – коефіцієнт поперечної деформації.

γ_{fs} – гранична амплітуда деформації зсуву в умовах симетричного знакозмінного кручення для заданої довговічності, ε_{fs} – гранична амплітуда осьової деформації в умовах симетричного розтягання-стискання для цієї ж довговічності.

$$\varepsilon_M = \frac{1}{\sqrt{2}(1 + \nu^*)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

$$\varepsilon_R = \frac{1}{1 + \nu^*} \left[\varepsilon_1 + \frac{\nu^*}{1 - 2\nu^*} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \right]$$

Зв'язок між довговічністю і деформаційним параметром руйнування встановлюється у вигляді рівняння малоциклової втоми типу Коффіна–Менсона:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{NP}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c. \quad (4)$$

При прогнозуванні довговічності металевих сплавів за блокового навантажування в роботі [1] запропоновано використовувати параметр $\Delta \varepsilon_{NP}$ спільно з модифікованою гіпотезою накопичування втомних пошкоджень Менсона-Хелфорда, що базується на кривій пошкоджуваності, за якою пошкоджуваність матеріалу визначається так

$$D = \sum_i \left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right)^q$$

$$q = A \left\{ \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^\beta + \frac{2\omega_\varepsilon}{\pi} \left[1 - \left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^\beta \right] \right\}, \quad (5)$$

де $A_{k-1} = e^{-2\alpha} + \alpha \lg \frac{\Delta \varepsilon_{k-1}}{\Delta \varepsilon_k}$, k – номер етапу навантажування, α – константа матеріалу, яка визначає ступінь додаткового зміцнення.

$$\omega_\varepsilon = \arctg \left(\frac{\gamma_{xy}(A)}{\varepsilon_x(A)} \cdot \frac{\varepsilon_{fs}}{\gamma_{fs}} \right) - \text{кут орієнтації траєкторії деформування у просторі деформацій типу}$$

Писаренко-Лебедєва.

$$\beta = m + a \cdot \text{sign}(N_{f1} / N_{f2} - 1), \quad (6)$$

де m і a – константи матеріалу; m – медіанне значення параметру β , a – амплітудне значення параметру β .

Параметри m, a, η' досліджуваних матеріалів зведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри кривої пошкоджуваності

BT1-0			304 SS		
η'	m	a	m	a	η'
0.104	0.8	0.4	0.4	0	0.1

Складність застосування запропонованого підходу полягає в тому, що для його реалізації необхідно знати значення матеріальних констант η та A_{k-1} , які визначаються з випробувань на малоциклову втому за непропорційними траєкторіями деформування.

У даній роботі розглядається варіант методу оцінювання втомної довговічності, коли замість коефіцієнту чутливості матеріалу до непропорційності навантажування η використовується його аналог, запропонований в роботі Ліу-Махадевана [4], згідно з яким:

$$\eta' = \begin{cases} 0, \varepsilon_a < \frac{\sigma_T}{E} \\ 0.55 + 0.45 \cos[\pi(s-1)], \varepsilon_a \geq \frac{\sigma_T}{E} \end{cases}. \quad (7)$$

ε_a – амплітуда осьової деформації; $s = \frac{\gamma_{fs}}{\varepsilon_{fs}}$ – відношення граничних деформацій, які відповідають границям витривалості, що отримують в умовах знакозмінного кручення та розтягання-стискання, відповідно.

Крім того у розрахунках параметру A_{k-1} замість коефіцієнту α брали η' .

Подальші розрахунки проводились за алгоритмом, який представлено на рис.1.

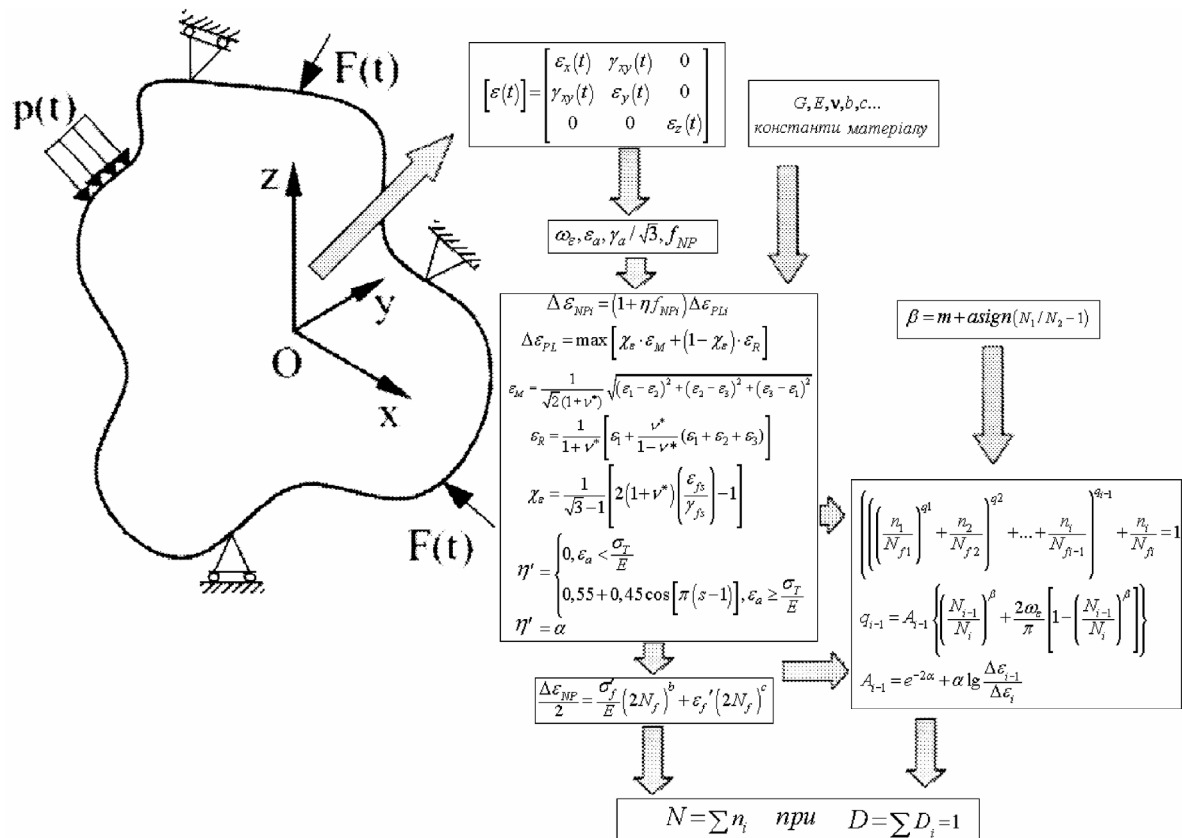


Рис.1 Алгоритм розрахунку

Результати експерименту.

Модель оцінки довговічності в умовах малоциклового багатовісного блокового навантажування, що пропонується в цій роботі перевірялась на експериментальних результатах, отриманих в роботах [1], [6] для титанового сплаву BT1-0 та нержавіючої сталі 304SS, відповідно.

Характеристики матеріалів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фізико-механічні характеристики титанового сплаву BT1-0 та нержавіючої сталі 304SS

Характеристика		304SS	BT1-0
Границя текучості, МПа	$\sigma_{0.2}$	405	490
	$\tau_{0.3}$	-	270
Границя міцності, ГПа	σ_B	754	565
Модуль пружності, ГПа	E	171	112
	G	66	39,5
Відносне видовження, %	δ	-	25
Відносне звуження, %	Ψ	-	55
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,3	-

Випробування на малоциклову втому за регулярного та блокового навантажування проводилися в жорсткому режимі з контролем за деформаціями. При цьому осьова деформація та деформація зсуву змінювались за синусоїдальним законом. У просторі повних деформацій складові осьової деформації $\varepsilon(t)$ і деформації зсуву $\gamma(t)$ задавалися так:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_a \sin(\omega t), \quad \gamma(t) = \gamma_a \sin(\omega t + \theta)$$

де ε_a, γ_a – амплітуда осьової деформації та деформації зсуву відповідно, ω – колова частота, θ – кут зсуву фаз.

Базові траєкторії деформування матеріалів представлені на рис. 2.

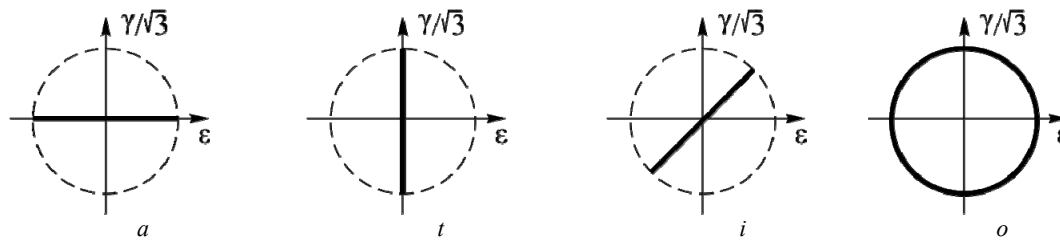


Рис.2 Базові траєкторії деформування

Програма експериментальних досліджень титанового сплаву BT1-0 на втому при блоковому малоцикловому навантажуванні включала:

- випробування зі зміною величини амплітуди еквівалентної деформації типу Мізеса за незмінної форми траєкторії деформування (рис. 1, траєкторії "a", "t");
- випробування зі зміною форми траєкторії деформування за незмінної амплітуди еквівалентної деформації типу Мізеса ;
- випробування зі зміною величини амплітуди еквівалентної деформації за Мізесом та форми траєкторії деформування .

У випадку нержавіючої сталі 304SS зразки випробувалися за чотирма програмами: at, io, oi, ta. Відносні числа циклів на перших ступенях приймали значення: 0,25; 0,5; 0,75.

Результати оцінки довговічності досліджуваних матеріалів представлені на рис.3 та рис.4.

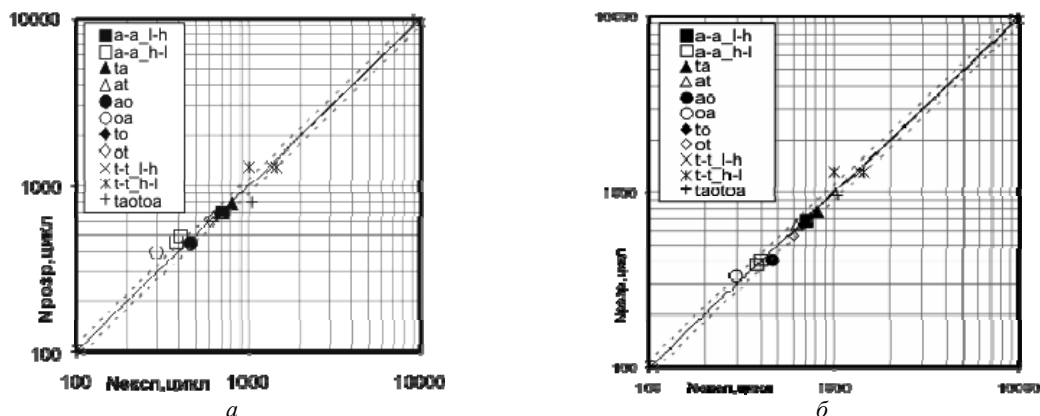


Рис.3 Порівняння розрахункових довговічностей з експериментальними даними для BT1-0 за підходом Ліу-Махадевана (а) і за роботою [1] (б)

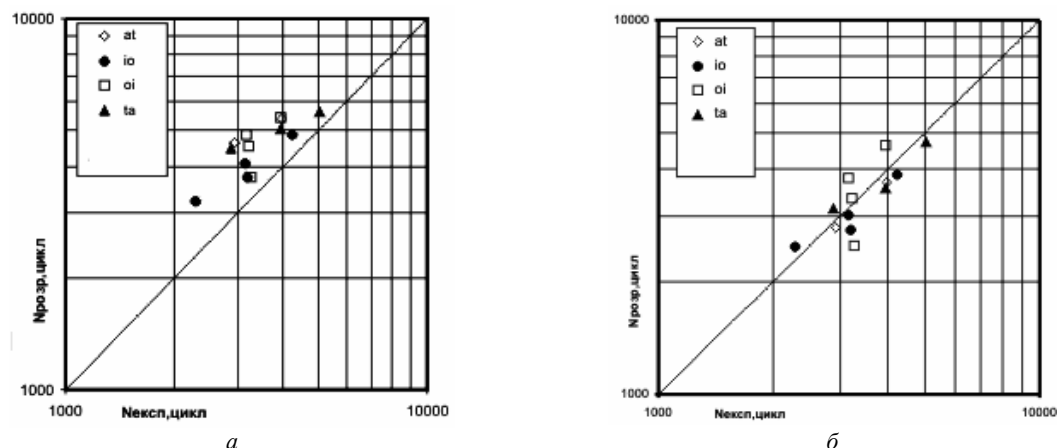


Рис.4 Порівняння розрахункових довговічностей з експериментальними даними нержавіючої сталі 304SS за підходом Ліу-Махадевана (а) і за роботою [1] (б)

За результатами проведених розрахунків на довговічність титанового сплаву BT1-0, а також нержавіючої сталі 304SS отримано коефіцієнти кореляції ρ та середньоквадратичні відхилення $S_{сер}$ між експериментальними і розрахунковими даними, які наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Величини ρ та $S_{сер}$

Матеріал	Запропонований підхід		Підхід роботи[1]	
	ρ	$S_{сер}, \%$	ρ	$S_{сер}, \%$
BT1-0	0,934	4,74	0,958	3,0
304SS	0,797	3,77	0,824	3,4

Як бачимо, хоч коефіцієнти кореляції, отримані за запропонованим підходом менші, а середньоквадратичні відхилення більші у порівнянні з підходом роботи [1], але ці відхилення є незначними.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження свідчать про те, що запропонований метод може бути використаний для оцінки втомної довговічності в умовах як одновісного, так і багатовісного (включаючи непропорційне) регулярного або нерегулярного малоциклового навантажування металевих сплавів з різною структурою за відсутності експериментальних даних.

Список літератури

1. Панасовський К.В. Метод оцінювання довговічності металевих сплавів при багатовісному малацикловому блочному навантажуванні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 01.02.04 "Механіка деформівного твердого тіла" / К.В.Панасовський. – Київ, 2008. – 20 с.
2. Itoh T., Sakane M., Ohnami M. and Sosie D. F. Nonproportional low cycle fatigue criterion for 304 stainless steel // Trans. ASME J.Engng. Mater. Technol.-1995.-vol. 117.-№ 3.-P.285-292
3. Гладський М.М. Метод оцінювання малоциклової міцності металевих сплавів при складному навантажуванні: автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук: спец 05.02.09 "Динаміка і міцність машин" / М. М. Гладський. – Київ, 2006.-20 с.
4. Liu Y., Mahadevan S. Strain-based multiaxial fatigue damage modelling Fatigue Fracture Engn Mater Struct, 2005, – Vol. 28. – pp. 1177-1189.
5. Itoh T., Sakane M., Ohnami M., Kida S., Sosie D. F. Dislocation Structure and Non-Proportional Hardening of Type 304 Stainless Steel. // In: Proceeding of the 5th International Conference Biaxial-Multiaxial Fatigue and Fracture, Cracow. - 1997. - vol. 1. - pp. 189 – 206.
6. Chen X., Jin D., Kim K.S. Fatigue life prediction of type 304 stainless steel under sequential biaxial loading // Int. J. of Fatigue. – Vol. 28. – 2006. – pp. 289–299.