В.П.Голуб, А.В.Плащинська, О.В.Романов

ЩОДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ РОЗРАХУНКУ ДОВГОВІЧНОСТІ ПРИЗМАТИЧНИХ СТЕРЖНІВ ВНАСЛІДОК ВТОМИ ЗА УМОВ ОДНОВІСНОГО АСИМЕТРИЧНОГО РОЗТЯГУ-СТИСКУ

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України,
вул. Нестерова, 3, Київ, 03057, Україна; e-mail: creep@inmech.kiev.ua

Abstract. The problems of calculation of a cycle number up to the destruction of the prismatic bars owing to the classical (multi-cycle) fatigue under conditions of the uniaxial asymmetrical tension-compression are solved. The solutions are built based on the equivalent stresses concept which structure is given following the hypothesis of the existence of the unified isochronous diagrams of limiting stresses using the power transcendental functions. The results of the calculation are approved experimentally.

Key words: prismatic bars, uniaxial asymmetrical tension-compression, high-cyclic fatigue, life-time analysis, experimental approval.

Вступ.

Для більшості відповідальних елементів сучасних конструкцій досить актуальною залишається проблема розрахунку їх довговічності внаслідок класичної (багатоциклової) втоми [1, 7, 10]. Особливо актуальною є проблема розрахунку довговічності внаслідок втоми за умов асиметричного циклічного навантаження, коли одночасно діють статичне та циклічне напруження.

Традиційно задачі розрахунку довговічності зразків матеріалів та елементів конструкцій внаслідок втоми за умов асиметричного навантаження розв'язуються за допомогою експериментальних кривих втоми та сформульованих на їх основі відповідних емпіричних співвідношень. Криві втоми будуються за результатами трудомістких випробувань на втому для кожного фіксованого значення статичної компоненти циклу напружень [12, 14, 17].

В роботах [2, 13, 15] запропоновано альтернативний емпіричному підхід щодо розв'язання задач розрахунку довговічності зразків матеріалів та елементів конструкцій внаслідок втоми за умов одновісного асиметричного навантаження. Цей підхід ґрунтується на концепції еквівалентних напружень, що дозволяє асиметричні цикли навантаження звести до симетричного. Структура еквівалентних напружень задається, виходячи із гіпотези існування єдиної діаграми граничних напружень в нормованій системі координат, яка є інваріантною щодо числа циклів до руйнування. В межах підходу розв'язано задачі розрахунку довговічності призматичних стержнів внаслідок втоми за умов асиметричного розтягу-стиску як функції амплітуди циклічних напружень по параметру середнього напруження асиметричного циклу [3, 4, 6, 11].

Мета цієї роботи полягає у розв'язанні задач розрахунку довговічності призматичних стержнів внаслідок багатоциклової втоми за умов одновісного асиметричного розтягу-стиску із врахуванням впливу середнього напруження циклу, коефіцієнту асиметрії та коефіцієнту амплітуд.

§1. Постановка задачі. Вихідні співвідношення.

Розглядається довготривале руйнування призматичних ізотропних стержнів внаслідок багатоциклової втоми за умов одновісного асиметричного розтягу – стиску. Умови навантаження задаються співвідношенням

$$\begin{cases} \tilde{\sigma} = \sigma_m + \sigma_a \sin(2\pi n); \\ \sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a < \sigma_Y, \end{cases} \tag{1.1}$$

де $\tilde{\sigma}$ – змінне напруження асиметричного циклу; σ_m – середнє напруження; σ_a – амплітуда циклічного напруження; $\sigma_{\max}$ – максимальне напруження в циклі; σ_Y – межа течії матеріалу стержня; $n = ft$ – число циклів навантаження; f – частота навантаження; t – фізичний час.

Рівень асиметрії циклу напружень задається коефіцієнтом асиметрії R та коефіцієнтом амплітуд A, так що

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{1-A}{1+A}; \;\; A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}, \tag{1.2}$$

причому за умов симетричного $(\sigma_m = 0)$ циклу навантаження $R = -1$ та $A = \infty$. Тут $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ – мінімальне напруження в циклі.

Вважається, що компоненти σ_m та σ_a циклічного напруження $\tilde{\sigma}$ в (1.1) не залежать від числа циклів навантаження n (стаціонарний режим), циклічна компонента $\sigma_a \sin 2\pi ft$ достатньо швидко $(f \geq 10$ Гц) змінюється від циклу до циклу, а максимальне напруження в циклі $\sigma_{\max}$ не перевищує межу течії σ_Y матеріалу стержня. У цьому випадку руйнування стержнів внаслідок втоми не супроводжується накопиченням макропластичних циклічних деформацій, а є наслідком розвитку процесу пошкодження і реалізується у багатоцикловій області із числом циклів до руйнування $n_R \geq 10^4$.

Кінетика накопичення пошкоджень внаслідок втоми задається еволюційним рівнянням [5, 6]

$$\frac{d\omega_f}{dn} = D_\sigma \left(\frac{\sigma_{eqv}}{1-\omega_f} \right)^{q_\sigma}, \tag{1.3}$$

де ω_f – скалярний параметр пошкодження, що змінюється від 0 при $n = 0$ до 1 при $n = n_R$; σ_{eqv} – еквівалентне напруження, що враховує вплив середнього напруження σ_m; n_R – число циклів до руйнування; q_σ, D_σ – константи матеріалів.

Величина еквівалентного напруження σ_{eqv} задається співвідношенням [3, 6, 16]

$$\sigma_{eqv} = \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a, \tag{1.4}$$

що дозволяє асиметричні цикли навантаження зводити до еквівалентного за числом циклів до руйнування симетричного циклу. Тут σ_B – межа короткочасної міцності матеріалу стержня; λ – константа матеріалу.

Задача полягає у розробці методу розрахунку та у розв'язанні задач розрахунку довговічності призматичних стержнів внаслідок багатоциклової втоми за умов одновісного асиметричного розтягу – стиску.

§2. Вихідні рівняння методу розрахунку довговічності внаслідок втоми.

Метод розрахунку ґрунтується на концепції еквівалентних напружень, вихідні рівняння якого складаються із рівняння для розрахунку числа циклів до руйнування та рівнянь для визначення констант матеріалів.

2.1. Залежність довговічності від еквівалентних напружень. Вихідні рівняння для розрахунку числа циклів до руйнування внаслідок втоми, що задають довговічність стержнів, формулюються на основі розв'язання системи рівнянь

$$\begin{cases} \dfrac{d\omega_f}{dn} = D_\sigma \left(\dfrac{\sigma_{eqv}}{1-\omega_f} \right)^{q_\sigma}; \\ \sigma_{eqv} = \left[\cos\left(\dfrac{\pi}{2} \dfrac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a, \end{cases} \tag{2.1}$$

яка зводиться до системи рівнянь

$$\begin{cases} n_R = \dfrac{1}{(1+q_\sigma) D_\sigma (\sigma_{eqv})^{q_\sigma}}; \\ \sigma_{eqv} = \left[\cos\left(\dfrac{\pi}{2} \dfrac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a \end{cases} \tag{2.2}$$

за умови, що $\omega_f = 0$ коли $n = 0$ та $\omega_f = 1$ коли $n = n_R$.

2.2. Методика визначення констант матеріалу. Вихідні рівняння (2.1) та (2.2), на підставі яких будуються відповідні рівняння та розв'язуються задачі розрахунку довговічності стержнів за умов одновісного асиметричного розтягу-стиску, містять три групи констант матеріалів, що підлягають визначенню із системи відповідних базових експериментів [3, 4, 6, 11].

Перша група констант матеріалів містить межу короткочасної міцності σ_B, яка визначається за результатами стандартних випробувань зразків матеріалу на одновісний розтяг.

Друга група констант матеріалів містить коефіцієнти q_σ та D_σ, що характеризують опір втомі матеріалу за умов одновісного симетричного та асиметричного розтягу-стиску. Значення коефіцієнтів розраховуються за результатами апроксимації експериментальних даних випробувань зразків матеріалу на втому за умов одновісного симетричного розтягу-стиску. Як апроксимуюча функція використовується співвідношення

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma) D_\sigma (\sigma_a)^{q_\sigma}}, \tag{2.3}$$

яке отримано із (2.2) за умов, що при $\sigma_m = 0$ еквівалентне напруження $\sigma_{eqv} = \sigma_a$.

Задача визначення коефіцієнтів q_σ та D_σ в (2.3) зводиться до мінімізації функціоналу

$$\Phi(q_\sigma, D_\sigma) = \sum_{j=1}^{S} \left\{ n_{Rj}(\sigma_{nj}) - \frac{1}{(1+q_\sigma) D_\sigma (\sigma_{aj})^{q_\sigma}} \right\}^2, \tag{2.4}$$

де σ_{aj}, n_{Rj} – набір дискретних значень амплітуд циклічних напружень та відповідних їм чисел циклів до руйнування.

Третя група констант матеріалів містить показник степені λ, що характеризує чутливість матеріалу до асиметрії циклу напружень. Значення λ розраховуються за результатами обробки експериментальних даних на втому за умов асиметричних циклів навантаження для декількох комбінацій статичних σ_m та амплітуд циклічних σ_a напружень. Задача визначення показника степені λ в (2.1) і, відповідно, в (2.2) зводиться до мінімізації функціоналу [3]

$$\Phi(\lambda) = \sum_{j=1}^{k} \left\{ \left[\frac{\sigma_{aj}}{\sigma_{nj}(n_{Rj})} \right]_{\exp} - \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_{mj}}{\sigma_B} \right) \right]^{\lambda} \right\}^2, \qquad (2.5)$$

де σ_{aj}, σ_{mj}, σ_{nj}, n_{Rj} – набір дискретних значень амплітуд циклічних напружень, середніх напружень, меж втоми за умов симетричного циклу напружень та відповідних їм чисел циклів до руйнування. Як σ_{aj} та σ_{mj} можуть бути вибрані значення $\sigma_{aj} = \sigma_{mj}$, що відповідають віднульовому циклу напружень так, що коефіцієнт амплітуд $A = 1$.

2.3. Матеріали стержнів. Константи матеріалів. Розв'язуються задачі розрахунку довговічності призматичних стержнів внаслідок втоми із алюмінієвих сплавів BS1476 HE10WP, BS1476 HE20WP, D16T та із жароміцних сплавів ЭИ867, ЭП109, ВЖЛ12У, що широко застосовуються в авіаційній та космічній техніці.

Характеристики короткочасної міцності σ_Y, σ_B та значення констант матеріалів q_σ, D_σ, λ, що знайдені за викладеною методикою, наведені в табл. 1 для алюмінієвих сплавів та в табл. 2 для жароміцних сплавів.

Таблиця 1

Сплав	θ, °C	σ_Y, МПа	σ_B, МПа	q_σ	D_σ, МПа$^{-q_\sigma}$ ·цикл$^{-1}$	λ
BS1476 HE10WP	20	266,4	308,9	9,352	$6{,}622 \cdot 10^{-27}$	2,31
BS1476 HE20WP	20	332,8	367,6	9,838	$9{,}354 \cdot 10^{-29}$	0,83
D16T	20	360,0	529,7	10,852	$4{,}797 \cdot 10^{-33}$	1,57

Таблиця 2

Сплав	θ, °C	σ_Y, МПа	σ_B, МПа	q_σ	D_σ, МПа$^{-q_\sigma}$ ·цикл$^{-1}$	λ
ЭИ867	20	850	1257	5,41	$8{,}38 \cdot 10^{-22}$	2,38
ЭП109	600	750	1080	6,13	$6{,}83 \cdot 10^{-22}$	3,08
ВЖЛ12У	20	760	900	3,90	$4{,}36 \cdot 10^{-16}$	1,83

Експериментальні дані, що були використані в процедурі визначення констант матеріалів, запозичені із [5, 8, 9].

§3. Довговічність стержнів у формі залежності числа циклів до руйнування від амплітуди циклічних напружень.

Задача розрахунку довговічності призматичних стержнів внаслідок втоми розв'язується по параметру середнього напруження, по параметру коефіцієнта асиметрії та по параметру коефіцієнта амплітуд.

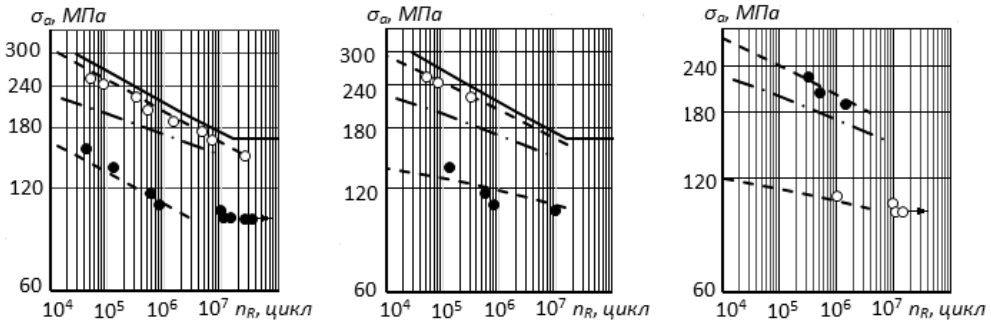
3.1. Розрахунок довговічності стержнів по параметру середнього напруження. Розв'язуються задачі розрахунку числа циклів до руйнування n_R призматичних стержнів із алюмінієвих та із жароміцних сплавів в залежності від амплітуди циклічних напружень σ_a для декількох фіксованих значень середнього напруження σ_m.

Для розрахунку числа циклів до руйнування n_R із (2.2) отримуємо рівняння

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma \left\{ \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a \right\}^{q_\sigma}}, \tag{3.1}$$

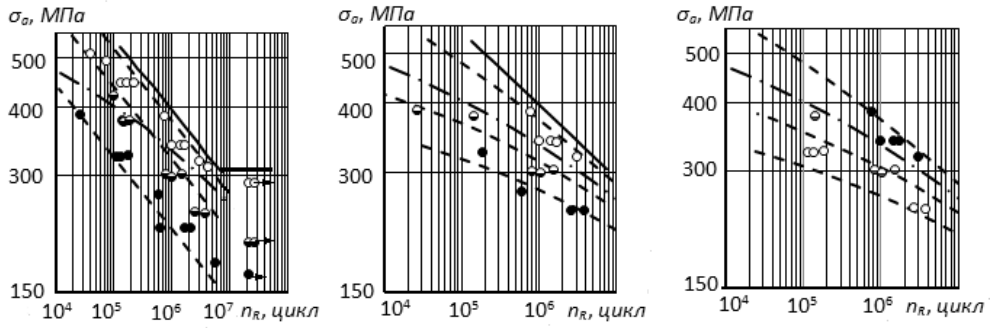
що встановлює залежність n_R від σ_a за умови, що $\sigma_m = \text{const}$.

У цьому розділі та у подальшому, як приклад, наводяться результати розрахунків довговічності призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867. Результати розрахунків порівнюються із експериментальними даними. Відповідні експериментальні дані запозичені із [5, 8].



а *б* *в*

Рис. 1



а *б* *в*

Рис. 2

Результати розрахунків довговічності призматичних стержнів внаслідок втоми, що виконано за рівнянням (3.1) для декількох фіксованих значень середнього напруження σ_m із використанням значень констант матеріалів (табл. 1, 2) наведено на рис. 1, *а* для стержнів із алюмінієвого сплаву D16T, а на рис. 2, *а* –із жароміцного сплаву ЭИ867. Результати розрахунків нанесено штриховими та штрих-пунктирними лініями, а експериментальні дані – маркерами. Суцільними лініями нанесено «криві» втоми за умов симетричного ($\sigma_m = 0$) циклу напружень. Довговічність стержнів зі сплаву D16T розраховано для значень $\sigma_m = 98{,}1$ (○); 392 (●) МПа та $\sigma_m = \sigma_a$ (–·–), а із сплаву ЭИ867 – для значень $\sigma_m = 196$ (○); 392 (◒); 589 (●) МПа та $\sigma_m = \sigma_a$ (–·–).

3.2. Розрахунок довговічності стержнів по параметру коефіцієнта асиметрії. Розв'язується задача розрахунку числа циклів до руйнування n_R призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 в залежності від амплітуди циклічних напружень σ_a для декількох значень коефіцієнта асиметрії R.

Для величини еквівалентного напруження σ_{eqv} із (1.4) із урахуванням (1.2) отримуємо співвідношення

$$\sigma_{eqv} = \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \, \frac{1+R}{1-R} \, \frac{\sigma_a}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a, \tag{3.2}$$

після підстановки якого в (2.2) для числа циклів до руйнування n_R отримуємо рівняння

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma) D_\sigma \left\{ \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \, \frac{1+R}{1-R} \, \frac{\sigma_a}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a \right\}^{q_\sigma}}, \tag{3.3}$$

що встановлює залежність n_R від σ_a за умови, що $R = \text{const}$.

Результати розрахунків довговічності призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 для декількох значень коефіцієнта асиметрії R, що визначені з рівняння (3.3) із використанням значень констант матеріалів (табл. 1, 2), наведено на рис. 1, *б* та рис. 2, *б,* відповідно. Результати розрахунків нанесено штриховими та штрих-пунктирними лініями, а експериментальні дані – маркерами. Довговічність стержнів розрахована для значень $R = -0{,}4$ (○); 0 (–·–);0,4 (●) із сплаву D16T та $R = -0{,}3$ (○); 0 (–·–); 0,13 (◒); 0,3 (●) із сплаву ЭИ867.

3.3. Розрахунок довговічності стержнів по параметру коефіцієнта амплітуд. Розв'язується задача розрахунку числа циклів до руйнування n_R призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 в залежності від амплітуди циклічних напружень σ_a для декількох значень коефіцієнта амплітуд A.

Для величини еквівалентних напружень σ_{eqv} із (1.4) з урахуванням (1.2) отримуємо співвідношення

$$\sigma_{eqv} = \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \, \frac{1}{A} \, \frac{\sigma_a}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a, \tag{3.4}$$

після підстановки якого в (2.2) для числа циклів до руйнування n_R отримуємо рівняння

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma) D_\sigma \left\{ \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \, \frac{1}{A} \, \frac{\sigma_a}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \sigma_a \right\}^{q_\sigma}}, \tag{3.5}$$

що встановлює залежність n_R від σ_a за умови, що $A = \text{const}$.

Результати розрахунків довговічності призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 для декількох значень коефіцієнта амплітуд A, що тримані з рівняння (3.5) із використанням значень констант матеріалів (табл. 1, 2), наведено на рис. 1, *в* та рис. 2, *в*, відповідно. Результати розрахунків нанесено штриховими та штрих-пунктирними лініями, а експериментальні дані – маркерами. Довговічність стержнів із сплаву D16T розрахована для значень $A = 0{,}35$ (○); 1 (–·–); 2 (●), а із сплаву ЭИ867 для значень $A = 0{,}5$ (○); 0,7 (◒); 0 (–·–); 1,85 (●).

§4. Довговічність стержнів у формі залежності числа циклів до руйнування від максимального напруження в циклі.

Задача розрахунку залежності довговічності призматичних стержнів внаслідок втоми від максимального напруження також розв'язується по параметру середнього напруження, по параметру коефіцієнта асиметрії та по параметру коефіцієнта амплітуд.

4.1. Розрахунок довговічності стержнів по параметру середнього напруження. Розв'язуються задачі розрахунку числа циклів до руйнування n_R призматичних стержнів із алюмінієвих та із жароміцних сплавів в залежності від максимального напруження $\sigma_{\max}$ для декількох фіксованих значень середнього напруження σ_m.

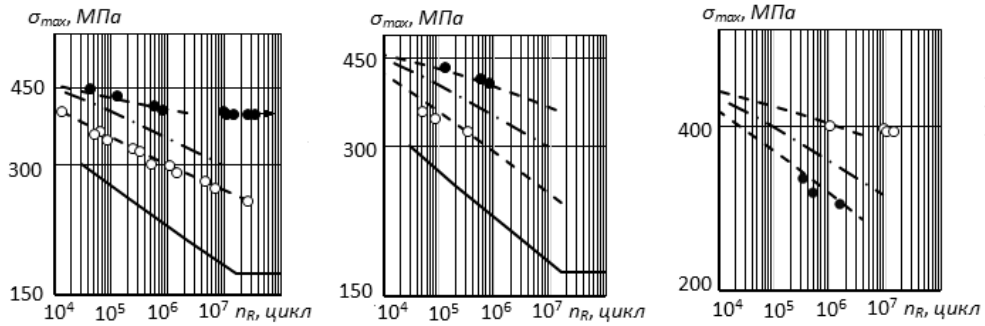
Для величини еквівалентного напруження σ_{eqv} із (1.4) з урахуванням (1.1) отримуємо співвідношення

$$\sigma_{eqv} = \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\,\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)\right]^{-\lambda}\left(\sigma_{\max}-\sigma_m\right), \tag{4.1}$$

після підстановки якого в (2.2) для розрахунку числа циклів до руйнування n_R отримуємо рівняння

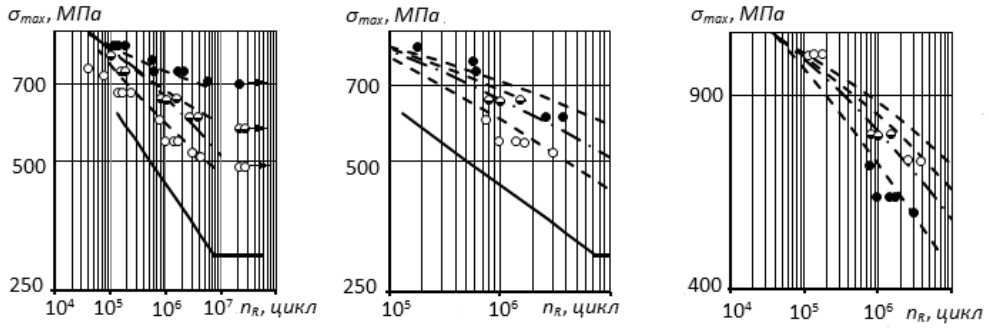
$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma\left\{\left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\,\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)\right]^{-\lambda}\left(\sigma_{\max}-\sigma_m\right)\right\}^{q_\sigma}}, \tag{4.2}$$

що встановлює залежність n_R від $\sigma_{\max}$ за умови, що $\sigma_m = \text{const}$.



а *б* *в*

Рис. 3



а *б* *в*

Рис. 4

Результати розрахунків довговічності призматичних стержнів внаслідок втоми, що визначені з рівняння (4.2) для декількох фіксованих значень середнього напруження σ_m із використанням значень констант матеріалів (табл. 1, 2), наведено на рис. 3, *а* для стержнів із алюмінієвого сплаву D16T, а на рис. 4, *а* – із жароміцного сплаву ЭИ867. Результати розрахунків нанесено штриховими та штрих-пунктирними лініями, а експериментальні дані – маркерами. Суцільними лініями нанесені «криві» втоми за умов симетричного ($\sigma_m = 0$) циклу напружень. Довговічність стержнів із сплаву D16T розрахована для значень σ_m = 98,1 (○); 392 (●) МПа та $\sigma_m = \sigma_a$ (−·−), а із сплаву ЭИ867 – для значень σ_m = 196 (○); 392 (◒); 589 (●) МПа та $\sigma_m = \sigma_a$ (−·−).

4.2. Розрахунок довговічності стержнів по параметру коефіцієнта асиметрії. Розв'язується задача розрахунку числа циклів до руйнування n_R призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 в залежності від максимального напруження в циклі $\sigma_{\max}$ для декількох фіксованих значень коефіцієнта асиметрії R.

Для величини еквівалентного напруження σ_{eqv} із (3.2) отримуємо співвідношення

$$\sigma_{eqv} = \left\{ \cos\left[\frac{\pi}{4}(1+R)\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_B} \right] \right\}^{-\lambda} \frac{(1-R)}{2}\sigma_{\max}, \tag{4.3}$$

після підстановки якого в (2.2) для числа циклів до руйнування n_R отримуємо рівняння

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma \left\{ \left[\cos\left(\frac{\pi}{4}(1+R)\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \frac{(1-R)}{2}\sigma_{\max} \right\}^{q_\sigma}}, \tag{4.4}$$

що встановлює залежність n_R від $\sigma_{\max}$ за умови, що $R = \text{const}$. В (4.1) та (4.2) прийнято, що

$$\sigma_m = \frac{(1+R)}{2}\sigma_{\max};\ \sigma_a = \frac{(1+R)}{2}\sigma_{\max}.$$

Результати розрахунків довговічності призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 для декількох значень коефіцієнта асиметрії R, що отримані з рівняння (4.4) із використанням значень констант матеріалів (табл. 1, 2), наведено на рис. 3, *б* та 4, *б*, відповідно. Результати розрахунків нанесено штриховими та штрих-пунктирними лініями, а експериментальні дані – маркерами. Довговічність стержнів із сплаву D16T (рис. 3, *б*) розрахована для значень $R = -0{,}4$ (○); 0 (−·−); 0,4 (●), а із сплаву ЭИ867 (рис. 4, *б*) – для значень $R = -0{,}3$ (○); 0 (−·−); 0,13 (◒); 0,3 (●).

4.3. Розрахунок довговічності стержнів по параметру коефіцієнта амплітуд. Розв'язується задача розрахунку числа циклів до руйнування n_R призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 в залежності від максимального напруження в циклі $\sigma_{\max}$ для декількох значень коефіцієнта амплітуд A.

Для величини еквівалентного напруження σ_{eqv} із (4.1) отримуємо співвідношення

$$\sigma_{eqv} = \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\ \frac{1}{1+A}\ \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \frac{A}{1+A}\sigma_{\max}, \tag{4.5}$$

після підстановки якого в (2.2) для числа циклів до руйнування n_R отримуємо рівняння

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma \left\{ \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{1+A} \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} \frac{A}{1+A} \sigma_{\max} \right\}^{q_\sigma}}, \qquad (4.6)$$

що встановлює залежність n_R від $\sigma_{\max}$ за умови, що $A = \text{const}$. В (4.5) та в (4.6) із урахуванням (1.2) принято, що

$$1+R = \frac{2}{1+A};\ 1-R = \frac{2A}{1+A}.$$

Результати розрахунків довговічності призматичних стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та із жароміцного сплаву ЭИ867 для декількох значень коефіцієнта амплітуд A, що визначені з рівняння (4.6) із використанням значень констант матеріалів (табл. 1, 2), наведено на рис. 3, *в* та 4, *в*, відповідно. Результати розрахунків нанесено штриховими та штрих-пунктирними лініями, а експериментальні дані – маркерами. Довговічність стержнів із сплаву D16T (рис. 3, *в*) розрахована для значень A = 0,35 (○); 1 (–·–); 2 (●), а із сплаву ЭИ867 (рис. 4, *в*) – для значень A = 0,5 (○); 0,7 (◒); 1 (–·–); 1,85 (●).

§5. Аналіз результатів.

Ефективність підходу до розв'язування задач розрахунку довговічності елементів конструкцій внаслідок класичної (багатоциклової) втоми, що ґрунтується на концепції еквівалентних напружень, апробується в роботі на задачах розрахунку довговічності призматичних стержнів за умов одновісного асиметричного розтягу-тиску. Розраховується число циклів до руйнування стержнів із алюмінієвого сплаву D16T та жароміцного сплаву ЭИ867.

В цілому, як це видно із порівняння розрахункових та експериментальних даних, що наведені на рис. 1 – 4, отримано цілком задовільне узгодження результатів розрахунків із даними експериментів. Максимальна похибка не перевищує 20% і на величину похибки практично не впливає структура залежності числа циклів до руйнування від характеристик та параметрів асиметричного циклу напружень, а також рівень напружень.

Висновки.

Підхід щодо розрахунку довговічності елементів конструкцій внаслідок класичної (багатоциклової) втоми за умов одновісного асиметричного розтягу-стиску, що ґрунтується на концепції еквівалентних напружень, може розглядатись як один із найбільш ефективних підходів до розв'язування такого класу задач. Концепція еквівалентних напружень дозволяє дію компонент асиметричного циклу зводити до дії еквівалентної за числом циклів до руйнування амплітуди симетричного циклу. При визначенні констант матеріалів як базові експерименти використовуються легко відтворювані стандартні випробування зразків матеріалу на короткочасну міцність та на втому за умов симетричного циклу навантаження, а також одиничний ідентифікуючий експеримент на втому за умов віднульового циклу.

Наукові дослідження, результати яких опубліковано в даній статті, виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541030).

РЕЗЮМЕ. Розв'язано задачі розрахунку числа циклів до руйнування призматичних стержнів внаслідок класичної (багатоциклової) втоми за умов одновісного асиметричного розтягу-стиску. Розв'язки будуються на основі концепції еквівалентних напружень, структура яких задається згідно з гіпотезою існування єдиних ізохронних діаграм граничних напружень із використанням степеневих трансцендентних функцій. Результати розрахунків апробовано експериментально.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: призматичні стержні, одновісний асиметричний розтяг-стиск, багатоциклова втома, розрахунок довговічності, експериментальна апробація.

1. *Болотин В.В.* Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – Москва: Машиностроение, 1983. – 312 с.
2. *Голуб В.П., Крижановский В.И.* К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1994. – № 4. – С. 3 – 15.
3. *Голуб В.П., Пелых В.Н., Погребняк А.Д.* Прогнозирование усталостной долговечности призматических металлических стержней при асимметричном растяжении-сжатии методом эквивалентных напряжений // Вісник НТУ України «КПІ». Машинобудування. – 2010. – № 58. – С. 177 – 182.
4. *Желдубовский А.В., Пелых В.Н., Погребняк А.Д., Регульский М.Н.* Расчетный метод оценки долговечности конструкционных сталей при осевом многоцикловом асимметричном нагружении // Надійність та довговічність машин і споруд. – 2012. – **36**. – С. 111 – 119.
5. *Ищенко И.И., Погребняк А.Д., Синайский Б.Н.* Влияние высоких температур на сопротивление усталости жаропрочных сталей и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1979. – 176 с.
6. *Пелих В.М.* Визначення довговічності конструкційних алюмінієвих сплавів за умови асиметричного розтягнення-стиснення // Наукові вісті Нац. техн. ун-ту «КПІ». – 2011. – № 6. – С. 114 – 119.
7. *Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие под ред. С.В.Серенсена. – Москва: Машиностроение, 1975. – 488 с.
8. *Сочава А.И.* Исследование влияния постоянной составляющей цикла на выносливость сплава Д16Т при осевых нагружениях // Известия ВУЗов. – 1975. – № 12. – С. 39 – 42.
9. *Форрест П.* Усталость металлов (пер. с англ. под ред. С.В.Серенсена). – Москва: Машиностроение, 1968. – 352 с.
10. *Хейвуд Р.Б.* Проектирование с учетом усталости (пер. с англ. под ред. И.Ф.Образцова). – Москва: Машиностроение, 1969. – 504 с.
11. *Golub V.P., Pelykh V.N., Pogrebnyak A.D.* Calculating the Fatigue Life of Prismatic Rods Subjected to Repeated Stress Cycling // Int. Appl. Mech. – 2013. – **49**, N 3. – P. 337 – 349.
12. *Karuskevich M., Maslak T.* Accelerated method for the alclad alloy fatigue curve construction by the surface relief pattern // Fatigue and Fracture of Engng. Materials and Struct. – 2021. – **44**, N 10. – P. 2913 – 2916.
13. *Kobzar Yu.M.* Modeling the Multicyclic Fatigue Failure of Rods under Symmetrical Tension-Compression // Int. Appl. Mech. – 2022. – **58**, N 1. – P. 91 – 101.
14. *Murakami Y., Takagi T., Wada K., Matsunaga H.* Essential structure of S-N curve: Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter // Int. J. of Fatigue. – 2021. – **146**. – 106138, 14 p.
15. *Plashchynska A.V.* Determinating the Duration of the Propagation Stages of Fatigue Cracks in Thin Aluminum Plates with Stress Concentrators // Int. Appl. Mech. – 2022. – **58**, N 2. – P. 189 – 198.
16. *Pogrebnyak A.D., Pelykh V.N., Kasperska V.V.* On Selection of the Model of Limiting State of Heat-Resistant Materials under Uniaxial Asymmetric Loading // Int. Appl. Mech. – 2018. – **54**, N 1. – P. 56 – 63.
17. *Strzelecki P., Correia J.A., Sempruch J.* Estimation of fatigue S-N curves for aluminium based on tensile strength – proposed method // In: MATEC Web of Conf. – 2021. – **338**. – 01026, 8 p.

Надійшла 01.12.2022 Затверджена до друку 27.06.2023