

А. Д. Погребняк

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ВПЛИВУ АСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ
НА ОПІР ВТОМІ ТА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

Abstract. The possibility of developing an express method for assessing the ultimate state of structural materials under asymmetric loading on the basis of fatigue tests with a symmetric cycle is investigated. The possibility of assessing the effect on durability with an high accurac of the values of the static component corresponding only with respect to plastic materials is established. Fragile, low-plastic materials are very sensitive to loading asymmetry, which excludes the possibility of assessing the effect of a static component on the durability of such materials. In this case, the accuracy of approximate calculations will be unsatisfactory.

Key words: high cycle fatigue, ultimate state, solid prismatic specimens, cyclic tension-compression.

Вступ.

Однією з основних причин передчасного виходу з ладу багатьох відповідальних елементів сучасних машинобудівних конструкцій є багатоциклова (класична) втома як найнебезпечніший і складно прогнозований тип тривалого руйнування [5, 6, 14, 15 – 17]. Особливо актуальною вважається проблема руйнування при одновісному асиметричному статичному й циклічному навантаженні. Статичний компонент істотно знижує опір втомі конструкційних матеріалів і відповідно довговічність конструкції, причому руйнування в цих умовах не супроводжується накопиченням макропластичних деформацій. Як приклад можна привести руйнування внаслідок втоми осей коліс транспортних засобів, елементів конструкцій планера літальних апаратів, валів двигунів, лопаток і дисків газових турбін, фрагментів мостових конструкцій, різного роду ресор та інших конструктивних елементів.

Дослідженню впливу асиметрії на опір втомі конструкційних матеріалів присвячені численні роботи [7, 9, 10, 13, 15, 16]. Вони ґрунтуються, як правило, на експериментальних дослідженнях і встановлюють певні закономірності. Рішення таких задач, на жаль, і сьогодні будуються на інтерпретації експериментальних даних у формі побудови різноманітних емпіричних співвідношень, область застосування яких досить обмежена.

Оцінка несучої здатності матеріалу в умовах спільного впливу циклічних і статичних навантажень при одновісному або двовісному їхньому впливі базується на основі діаграм граничного стану. Побудова таких діаграм здійснюється за результатами досить тривалих і трудомістких експериментальних досліджень опору втомі конструкційних матеріалів при досить великій витраті досліджуваних матеріалів. Однак подальші дослідження втоми матеріалів в цьому напрямку сприятимуть накопиченню додаткової необхідної інформації. Разом із цим виникає необхідність у розробці альтернативних

методів, наприклад, експрес-методів оцінки впливу асиметрії навантаження на опір втомі конструкційних матеріалів, використовуючи як базу характеристики втоми, отримані за умов симетричного циклу навантаження.

1. Постановка задачі дослідження й вихідні співвідношення.

Розглянемо руйнування внаслідок втоми суцільних циліндричних зразків із металевих конструкційних матеріалів при нормальній і помірних гомологічних температурах.

Зразки піддаються впливу асиметричного навантаження розтягом – стиском

$$\tilde{\sigma} = \sigma_m (h(t) + \sigma_a g(n)),$$

де σ_m й σ_a – статичний і циклічний компоненти циклу навантаження; $h(t)$ – одинична функція Хевисайда ($h=0$ при $t < 0$ й $h=1$ при $t > 0$); $g(n)$ – відома періодична функція числа циклів $n(n=ft)$ зміни циклічного компонента; t – фізичний час; f – частота навантаження.

Розглянемо область багатоциклової втоми ($f \geq 10$ Гц, $n \geq 10^4 \dots 10^5$ циклів), при якій максимальні напруження в циклі не перевищують макроскопічну границю текучості матеріалу. У цьому випадку руйнування внаслідок втоми не супроводжується накопиченням пластичних деформацій і є квазікрихким.

Ступінь асиметрії циклу задається коефіцієнтом асиметрії R_σ й коефіцієнтом амплітуд A_σ

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; A_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R_\sigma}{1 + R_\sigma}. \quad (1)$$

Тут $\sigma_{\min}$ і $\sigma_{\max}$ – мінімальне й максимальне значення напруження циклу навантаження.

Задача полягає у подальшому дослідженні втоми та в розробці експрес-методу оцінки впливу асиметрії навантаження на граничний стан і довговічність конструкційних матеріалів при циклічному навантаженні з використанням вихідних характеристик при симетричному навантаженні. Для її рішення виконаємо детальний аналіз результатів відомих досліджень втоми металевих матеріалів за умов асиметричного навантаження.

1.1. Моделі граничного стану конструкційних матеріалів. Оцінка впливу асиметрії циклу напружень при циклічному навантаженні на граничний стан і довговічність матеріалів здійснюється, як відзначалося, насамперед, експериментально у формі аналізу стандартних кривих втоми, які будуються по параметрам статичного компонента. Криві втоми задають залежність числа циклів до руйнування від амплітуди циклічних напружень і апроксимуються степеневими або експонентними функціями, коефіцієнти яких приймаються залежними від статичного компонента циклу напружень. Як приклад, на рис. 1, а представлені результати втомних випробувань зразків жароміцного нікелевого сплаву ЭП109 при одновісному розтягу – стиску й температурі 600°C в умовах симетричного й асиметричного циклів навантаження (статична складова зазначена на графіку) у вигляді кривих втоми. Представлена ілюстративна інформація свідчить про ступінь зниження довговічності сплаву й природно опору втомі у зв'язку із впливом статичної складової циклу напружень, тобто фактично відображає реакцію матеріалу на асиметрію навантаження.

Вплив асиметрії циклу напружень на довговічність і граничний стан матеріалів відображають також діаграми граничних амплітуд напружень. Вони будуються на підставі обробки експериментальних кривих втоми й встановлюють більш наочну залежність між значеннями статичних і амплітудами циклічних напружень по параметрам числа циклів до руйнування.

На рис. 1, б показані діаграми граничних напружень сплаву ЭП109 при температурі 600 °С, побудовані по параметрам числа циклів до руйнування для чотирьох довговічностей, зазначених на графіку. Крпки відповідають амплітудам напружень, певним для вищевказаних довговічностей за результатами статистичної обробки даних випробувань. Лінії, близькі до лінійних залежностей, характеризують у цьому випадку реакцію сплаву на асиметрію навантаження.

До теперішнього часу на основі результатів експериментальних досліджень запропоновано досить багато емпіричних співвідношень і модельних подань для аналітичної інтерпретації діаграм граничних амплітуд напружень [9, 10, 14 – 16]. Структури емпіричних співвідношень надзвичайно різноманітні. Вони залежать від властивостей конкретного матеріалу й області їхнього застосування, на жаль, обмежується цим матеріалом. Все різноманіття діаграм граничних амплітуд напружень умовно може бути зведене до чотирьох характерних типів, представлених на наведеній ілюстрації (рис. 2), а саме опуклі (параболічна 2; еліптична 3), лінійні (1), увігнуті (гіперболічна 4). Фактично вони відображають різну реакцію конструкційних матеріалів на асиметрію навантаження.

При одновісному асиметричному навантаженні, як моделі граничного стану, найбільше застосування в розрахунковій практиці одержали лінійні залежності Гудмана й Зодерберга, модифікована лінійна залежність Хейвуда, нелінійні залежності Герберга й Смита [8, 11, 12]. По суті, вони є оперативним експериментом визначення характеристик опору втомі при асиметричному навантаженні. Однак, кожна з існуючих моделей граничного стану задає свою строго фіксовану форму діаграм граничного стану та не враховує особливості реакції реальних конкретних матеріалів на асиметрію навантаження в них.

Розгорнутий аналіз визначення поведінки конструкційних матеріалів в умовах асиметричного навантаження свідчить про те, що їхня реакція на асиметрію може бути істотно різною та у першу чергу вона залежить від властивостей конкретного матеріалу – міцності, пластичності й інших факторів. Рекомендовані різного роду моделі й емпіричні залежності не забезпечують необхідної точності визначення граничного стану й довговічності в широкому діапазоні зміни показників A_σ і R_σ . Ця невизначеність практично виключає можливість надійної оцінки впливу асиметрії навантаження на втому матеріалів та можливість запропонувати на підставі відомих співвідношень досить надійний експрес-метод оцінки граничного стану конструкційних матеріалів при мінімальному об'ємі експериментальних досліджень, наприклад, за даними при симетричному циклі навантаження. У всякому разі в літературі відсутні спроби вирішити цю задачу.

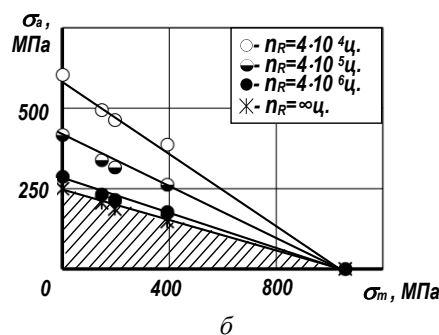
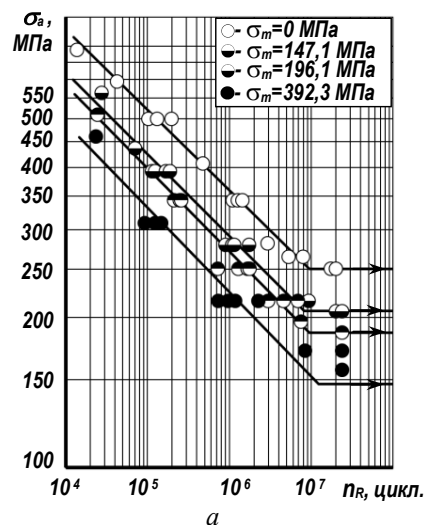


Рис. 1

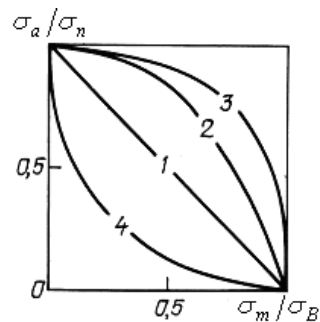


Рис. 2

Запропоновані вище методики й підходи можуть розглядатися лише як орієнтовні варіанти оцінки поведінки конструкційних матеріалів при асиметричному циклі навантаження в силу їхньої розмаїтості, високої їхньої чутливості до прояву різних факторів і складності процесу поведінки матеріалу в умовах комбінованого статичного й циклічного навантаження. Вони практично відображають умовну поведінку конструкційного матеріалу в умовах асиметричного навантаження, що не відповідає їхньому реальному поведінку. У той же час, при порівнянні різних конструкційних матеріалів, підданих асиметричному навантаженню, і виборі необхідного матеріалу, наприклад, при конструкторських проробленнях виробів нової техніки, виникає нагальна потреба в такому виборі на основі більш надійних відомих характеристик опору втомі, наприклад, при симетричному циклі навантаження.

У роботі здійснено спробу сформулювати можливий метод попередньої оцінки впливу асиметрії навантаження на опір втомі конструкційних матеріалів за результатами їхніх випробувань, наприклад, при симетричному навантаженні.

1.2. Обґрунтування можливості розробки експрес-методу оцінки граничного стану конструкційних матеріалів. У роботах [1, 2, 7] запропонований новий підхід до оцінки впливу асиметрії навантаження на граничний стан і довговічність конструкційних матеріалів, заснований на експериментально встановленому факті існування для кожного матеріалу єдиної нормованої діаграми, інваріантної стосовно числа циклів до руйнування з незалежними від часу параметрами рівняння у відносній системі координат. Скористаємося результатами запропонованого підходу для можливого формулювання експрес-методу визначення впливу асиметрії навантаження на опір втомі матеріалу по його характеристиках втомі, отриманих при симетричному навантаженні. Практично цей підхід являє собою метод прискореного визначення характеристик досліджуваних матеріалів при асиметричному навантаженні, що забезпечує їхнє надійне визначення при мінімальному об'ємі експериментальних досліджень.

Ідеологія підходу до оцінки реакції конструкційних матеріалів на асиметрію навантаження, як зазначено вище, базується на встановленому існуванні для кожного матеріалу єдиної нормованої граничної залежності, інваріантної стосовно числа циклів до руйнування. Використання степеневих тригонометричних функцій для їх опису дозволяє сформулювати моделі граничного стану й розрахувати довговічність матеріалу при мінімальному об'ємі експериментальних досліджень із високим ступенем вірогідності.

Численні дослідження й перевірки запропонованого нового підходу продемонстрували задовільний результат оцінки граничного стану для визначення характеристик опору втомі й довговічності матеріалів при асиметричному навантаженні. Як приклад, на рис. 3 наведено результати розрахунку діаграм граничних амплітуд напружень (лінії) з його використанням у зіставленні з експериментальними даними (крапки) для трьох матеріалів – вуглецевої сталі 1Х2М (рис. 3, а): лінії 1, 2 – $n_R = 10^5, 10^6$ цикл; жароміцного нікелевого сплаву ЭИ867 (рис. 3, б): 1, 2 – $n_R = 1,25 \cdot 10^5, 1,25 \cdot 10^6$ цикл і складно-легованої сталі ЭИ787 (рис. 3, в): 1, 2 – $n_R = 10^5, 10^6$ цикл. Ці матеріали відрізняються вихідними характеристиками міцності й пластичності. Вихідна інформація запозичена з робіт [16, 17].

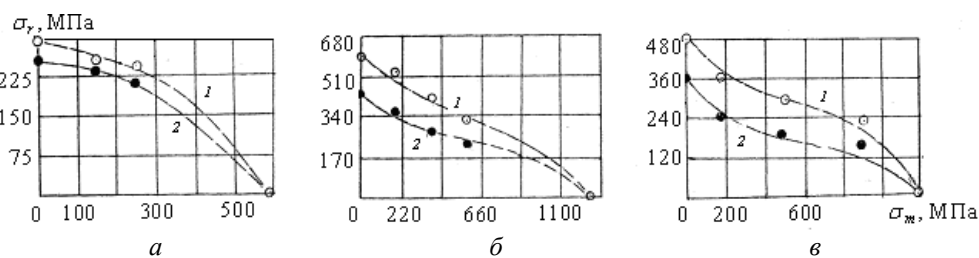


Рис. 3

Втомні випробування досліджених матеріалів виконано при одновісному симетричному й асиметричному навантаженні розтягом-стиском в умовах низьких гомологічних температур. Характеристики матеріалів – межі короткочасної міцності, пластичності, умови втомних випробувань – статична складова циклу напружень і температура. Результати випробувань у вигляді меж втоми наведено в таблиці. Тут же представлено значення коефіцієнта амплітуд A_σ , що характеризують співвідношення напружень у циклі в діапазоні довговічностей $n = 10^5 - 10^7$ циклів.

Таблиця

Матеріал, °C	σ_B , МПа δ , %	σ_m , МПа	σ_m/σ_B	σ_{-1} , σ_r , МПа	$A_\sigma = \sigma_a/\sigma_m$			k		
					10^5	10^6	10^7	10^5	10^6	10^7
Сталь 1Х2М, 20°	592 22,9	0	0	240	∞	∞	∞	0	0	0
		150	0,25	204	1,73	1,55	1,36	0,12	0,11	0,15
		250	0,42	182	1,00	0,83	0,73	0,15	0,20	0,24
Сплав ЭИ867, 20°	1257 12	0	0	300	∞	∞	∞	0	0	0
		200	0,16	255	2,77	1,85	1,27	0,14	0,15	0,15
		400	0,32	200	1,10	0,74	0,50	0,32	0,32	0,33
		600	0,49	170	0,59	0,40	0,28	0,45	0,45	0,43
Сталь ЭИ787, 400°	1200 11,0	0	0	280	∞	∞	∞	0	0	0
		250	0,21	210	1,41	0,94	0,84	0,27	0,33	0,25
		500	0,42	150	0,60	0,36	0,30	0,37	0,48	0,46
		900	0,75	125	0,25	0,15	0,14	0,52	0,61	0,55

Ці матеріали обрані як представники конструкційних матеріалів, що відрізняються різними міцнісними та пластичними властивостями, й це практично визначило принципово різну їхню реакцію на асиметрію навантаження, що й демонструють наведені вище діаграми. Крапки відображають значення амплітуд циклічних напружень, певних на основі статистичної обробки результатів випробувань на втому зразків і розрахунку кривих втоми досліджених матеріалів.

Зіставлення розрахованих діаграм з результатами експерименту показало цілком задовільне узгодження – погрішність розрахунку в порівнянні з експериментом не перевищує $\pm 5\%$.

Далі, використовуючи фактичний матеріал, відповідно до мети дослідження, виконано оцінку ступеня впливу асиметрії навантаження на опір втоми матеріалів у діапазоні $n = 10^5 - 10^7$ циклів через розрахунок зниження характеристик опору втоми за умов симетричного навантаження – меж (обмежених меж) втоми при різних значеннях статичного компонента циклу напружень шляхом розрахунку значень k , що характеризують це зниження за рахунок асиметрії навантаження, тобто фактично відбивають реакцію матеріалу на дію статичного компонента циклу. Тут k характеризує собою ступінь зміни фізичної (2) або обмеженої межі (3) втоми матеріалів у зв'язку із впливом статичного компонента при асиметричному циклі.

Значення k визначалося за формулами

$$k = \frac{\sigma_{-1} - \sigma_r}{\sigma_{-1}}; \quad (2)$$

$$k = \frac{\sigma_n - \sigma_r}{\sigma_n}, \quad (3)$$

де σ_{-1} – значення межі або обмеженої межі σ_n втоми при певній базі випробувань в умовах симетричного циклу навантаження; σ_r – аналогічні характеристики опору вто-

мі при асиметричних циклах навантаження при тій же базі випробувань. Значення σ_{-1} , σ_n і σ_r визначені за результатами втомних випробувань зразків зазначених матеріалів. Розрахунки k виконано в роботі для трьох значень довговічності – при $n = 10^5, 10^6, 10^7$ циклів. Результати виконаних розрахунків значень k наведено в таблиці.

Оцінка ступеня впливу асиметрії навантаження виконувалася для різних значень коефіцієнта амплітуд A_σ . Розрахунок значень A_σ здійснювали, використовуючи результати втомних випробувань зразків матеріалів, що послужили основою для розрахунку кривих втоми при симетричному й асиметричному навантаженні.

Вплив асиметрії оцінювався в широкому діапазоні зміни статичного компонента. Співвідношення σ_m/σ_B змінювалися в межах від 0,16 (сплав ЭИ867) до 0,75 (сталь ЭИ787). Це, у свою чергу, характеризувало широку зміну значень коефіцієнта амплітуди A_σ в дослідженому діапазоні довговічностей.

Виконані розрахунки значень k продемонстрували наступне: для сталі 1X2M значення k змінювалося в межах 0,11 – 0,24 у діапазоні $10^5 - 10^7$ циклів; для сплаву ЭИ867 – в межах 0,14 – 0,45; для сталі ЭИ787 – в межах 0,25 – 0,61 у тім же діапазоні довговічностей залежно від параметрів циклу навантаження. Таким чином, статичний компонент циклу напружень впливає на опір втомі досліджених матеріалів у всьому діапазоні довговічностей, причому цей вплив, насамперед, залежить, як свідчать дані таблиці, від вихідних (втомних) характеристик матеріалу – міцності і його пластичності, які в остаточному підсумку визначають його реакцію на асиметрію навантаження – для більш пластичних матеріалів (сталь 1X2M) вплив асиметрії найменший. Характерно, що зі збільшенням статичного компонента ступінь впливу на опір втомі зростає для всіх досліджуваних матеріалів, незалежно від характеристик міцності і пластичності.

Такі висновки отримано за результатами аналізу реальних експериментальних досліджень опору втомі конкретних конструкційних матеріалів. Вони свідчать про неоднозначний вплив асиметрії навантаження на опір втомі – більш пластичні матеріали менш чутливі до асиметрії навантаження, малопластичні – більш чутливі. Це свідчить про те, що характеристики втоми, отримані при симетричному циклі навантаження, можуть бути використані для оцінки втоми тільки пластичних матеріалів, причому похибки можуть досягати 20%.

Як приклад, скориставшись наявною експериментальною інформацією й виконаними розробками, здійснимо умовний експеримент по оцінці впливу асиметрії навантаження на опір втомі, задавшись стосовно до зазначених матеріалів одним відносним значенням статичного компонента σ_m , рівним, наприклад, усього лише 20% від σ_B . Для зазначених матеріалів – сталі 1X2M, сплаву ЭИ867, сталі ЭИ787 у цьому випадку значення σ_m будуть рівні орієнтовно 120, 250 і 240 МПа.

Використовуючи залежності [3, 4]

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^\lambda \quad (2)$$

та

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right], \quad (3)$$

визначаємо значення обмеженої межі σ_a , наприклад, для $n_R = 10^6$ циклів при асиметричному навантаженні вказаних матеріалів, що відповідають вищевказаним статичним компонентам. Вони виявилися рівними для досліджених матеріалів 240, 370 і 240 МПа.

При симетричному навантаженні, згідно вихідним експериментальним даним, межі обмеженої втоми для досліджуваних матеріалів при довговічності 10^6 циклів виявилися рівними 260, 500 і 350 МПа. Визначимо ступінь зниження опору втомі зазначених матеріалів у зв'язку із впливом статичного компонента через значення k . Воно дорівнює 7,7% для сталі 1Х2М, 26% для сплаву ЭИ867 і 31,4% для сталі ЭИ787 при впливі однакового відносного значення статичного компонента (при $\sigma_m = 0,2\sigma_B$ для кожного матеріалу). Природно, при більших значеннях статичної складової циклу навантаження зазначені цифри будуть істотно більшими, що підтверджують розрахунки k для широкого діапазону σ_m , наведено в таблиці.

Таким чином, виконані розрахунки з використанням єдиної граничної діаграми свідчать про те, що в першому наближенні можливий експрес-метод орієнтовної оцінки впливу асиметрії навантаження за даними при симетричному навантаженні при відносно незначному статичному компоненті (не перевищуючому приблизно 20% від межі міцності досліджуваного матеріалу) лише для пластичних матеріалів, до яких зокрема відноситься сталь 1Х2М. Для малопластичних матеріалів, таких як сплав ЭИ867 і сталь ЭИ787, спроба використовувати подібний підхід виключається, тому що не забезпечить очікуваний результат.

2. Обговорення результатів.

Численними експериментальними дослідженнями встановлено, що статична складова при асиметричному навантаженні змінює циклічну складову в широкому діапазоні й тільки граничні діаграми встановлюють достовірну інформацію про реакцію матеріалу на асиметрію циклу навантаження, оцінювану на основі експериментальних досліджень, як правило, досить трудомістких і тривалих.

У роботі досліджувалася можливість розробки експрес-методу оцінки граничного стану ряду конструкційних матеріалів при асиметричному навантаженні по характеристиках, отриманих при симетричному навантаженні, використовуючи єдину граничну діаграму, яка порівняна з відомими емпіричними співвідношеннями, забезпечує більш надійну реакцію конструкційних матеріалів на асиметрію навантаження. Розглядали матеріали, що відрізняються характеристиками короткочасної міцності й пластичності у вихідному стані при низьких гомологічних температурах. При цьому статичний компонент варіювався в досить широких межах: мінімальне співвідношення статичного компонента й межі статичної міцності σ_B перебувало на рівні 16 – 21%, а найбільше співвідношення становило 50 – 75% залежно від матеріалу й умов випробувань. Оцінку характеристик досліджуваних матеріалів при асиметричному навантаженні і їхнє зіставлення з характеристиками при симетричному навантаженні здійснювали в діапазоні $n = 10^5 - 10^7$ циклів.

Результати зіставлення представлено у вищенаведеній таблиці. Їхній аналіз свідчить про те, що реакція конкретного матеріалу на асиметрію навантаження залежить, насамперед, від його вихідних властивостей. В експериментах значення коефіцієнта амплітуд A_σ варіювалися в широких межах (табл.). При цьому виявилось, що зниження опору втомі у вигляді меж втоми у зв'язку із впливом статичного компонента асиметричного навантаження визначається, насамперед, характеристиками статичної міцності й пластичності та звичайно рівнем статичного напруження в експерименті. У цьому випадку для пластичної сталі 1Х2М ($\delta \approx 23\%$) навіть при співвідношенні $\sigma_m/\sigma_B = 0,25$ зниження межі втоми склало, наприклад, всього лише 0,11 – 0,15%. Для нікелевого сплаву ЭИ867, що володіє більшою міцністю й меншою пластичністю ($\delta \approx 12\%$), при меншому співвідношенні $\sigma_m/\sigma_B = 0,16$ зниження межі втоми перебуває на рівні 15%, а зниження межі втоми високоміцної сталі ЭИ787 ($\delta \approx 11\%$) при співвідношенні $\sigma_m/\sigma_B = 0,21$ перевищує 25%.

Таким чином, виконані розрахунки свідчать, що експрес-оцінка опору втомі при асиметричному навантаженні по характеристиках при симетричному навантаженні можлива в першому наближенні лише при відносно невеликому співвідношенні статичного компонента й межі міцності, реалізованому в експерименті й складатиме 0,15 – 0,25. У цьому випадку погрішність оцінки опору втомі при асиметричному навантаженні за даними при симетричному навантаженні складе 10 – 15% залежно від властивостей матеріалу. Збільшення статичної складової циклу напружень практично виключає можливість експрес-оцінок з використанням даних при симетричному навантаженні практично для будь-якого матеріалу у зв'язку з істотним підвищенням погрішностей, що перевищують вищенаведені цифри. Особливо це характерно для малопластичних, крихких матеріалів, поведінку яких при асиметричному навантаженні описують гіперболічні залежності.

Аналогічний результат отриманий за даними умовного експерименту, при якому матеріали, що відрізняються вихідними міцнісними й пластичними властивостями, були піддані впливу одного і того самого відносного рівня статичного компонента.

Таким чином, можливий експрес-метод не в змозі забезпечити надійну інформацію про реакцію матеріалу на асиметрію циклу в широкому діапазоні зміни σ_m за даними, отриманими при симетричному циклі навантаження, тим більше не забезпечує бажаного результату використання залежностей Гербера, Зодерберга й багатьох інших дослідників.

Отже, маючи у своєму розпорядженні дані про опір втомі при симетричному циклі навантаження, припустима експрес-оцінка опору втомі при асиметричному навантаженні в межах 10% від межі втомі при симетричному навантаженні для пластичних матеріалів. Стосовно до більших значень статичного компонента σ_m необхідні відповідні експериментальні дослідження й розрахункові оцінки. У цьому випадку альтернативним підходом масштабному експерименту при асиметричному навантаженні може бути використання моделей граничного стану [14, 15, 18], в основі яких лежить установлене існування єдиних нормованих діаграм, інваріантних стосовно числа циклів до руйнування, описуваних тригонометричними функціями.

Висновок.

Визначення опору втомі й граничного стану конструкційних матеріалів при асиметричному навантаженні й оцінка впливу статичного компонента на них на практиці звичайно здійснюється на основі тривалих і трудомістких втомних випробувань. Їхні результати широко використовуються в розрахунковій практиці при створенні машинобудівних конструкцій. Із числа відомих методів оцінки опору втомі й граничного стану досить оперативним є підхід, заснований на використанні єдиних нормованих діаграм, інваріантних стосовно числа циклів до руйнування, що забезпечують високий ступінь вірогідності результатів розрахунку при відносно невеликому об'ємі експериментальних досліджень.

У роботі виконано спробу сформулювати експрес-метод оцінки опору втомі й граничного стану конструкційних матеріалів при їхньому порівнянні або для орієнтовного вибору матеріалу на початковій стадії проектних робіт стосовно до асиметричного навантаження за даними, отриманими при симетричному навантаженні з точністю 5 – 10%. Виконані розрахунки свідчать про те, що можливість використання такого підходу визначається, насамперед, вихідними властивостями конкретного матеріалу, його реакцією на асиметрію навантаження. З точністю 5 – 10% можливе визначення опору втомі й граничного стану при асиметричному навантаженні в умовах дії щодо невеликих статичних напружень по характеристикам втомі при симетричному навантаженні лише для пластичних матеріалів. Крихкі, малопластичні матеріали досить чутливі навіть до впливу невеликого статичного компонента, у зв'язку із чим виникаючі погрішності не забезпечать розрахувачеві необхідної точності визначення опору втомі при асиметричному навантаженні.

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

РЕЗЮМЕ. Досліджено можливість розробки експрес-методу оцінки граничного стану конструкційних матеріалів при несиметричному навантаженні на основі випробувань на втому із симетричним циклом. Встановлено можливість оцінки впливу на довговічність з високою точністю значень статичної складової, що відповідають тільки пластичним матеріалам. Крихкі малопластичні матеріали дуже чутливі до асиметрії навантажень, що виключає можливість оцінки впливу статичної складової на довговічність таких матеріалів. У цьому випадку точність наближених розрахунків буде незадовільною.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: багатоциклова втома, граничний стан, суцільні призматичні зразки, циклічний розтяг-стиск.

1. Биргер И.А. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей (под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Балашова). – Москва: Машиностроение, 1981. – 222 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., Погребняк А.Д. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1994. – 228 с.
4. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. – Москва: Металлургиздат, 1963. – 258 с.
5. Кеннеди А.Дж. Ползучесть и усталость в металлах (пер. с англ. под ред. В.М. Розенберга). – Москва: Металлургия, 1965. – 312 с.
6. Кузьменко В.А., Ищенко И.И., Троян И.А., Гришаков С.В. и др. Влияние частоты нагружения, температуры и асимметрии цикла на выносливость теплостойких сталей 1Х2М и Х18Н9. Сообщение 1 // Пробл. прочности. – 1980. – № 4. – С. 35 – 40.
7. Кузьменко В.А., Ищенко И.И., Троян И.А., Гришаков С.В. и др. Влияние частоты нагружения, температуры и асимметрии цикла на выносливость теплостойких сталей 1Х2М и Х18Н9. Сообщение 2 // Пробл. прочности. – 1981. – № 2. – С. 30 – 36.
8. Лебедев А.А. Справочное пособие по расчету машиностроительных конструкций на прочность. – Киев: Техника, 1990. – 240 с.
9. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность материалов. – Москва: Машгиз, 1967. – 250 с.
10. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – Москва: Машиностроение, 1975. – 488 с.
11. Троценко В.Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Ч. 2. – Киев: Наук. думка, 1994. – 704 с.
12. Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 268 с.
13. Ужик Г.В. Прочность сталей при одновременном действии постоянных и переменных нагрузок // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук, 1949. – № 5. – С. 657 – 665.
14. Golub V.P., Pavlyuk Ya.V., Rezyuk V.S. Calculation of Creep Strains of the Thin-Walled Tubular Members Made of Linear Viscoelastic Materials Under Tension and Torsion // Int. Appl. Mech. – 2022. – **58**, N 2. – P. 160 – 169.
15. Golub V.P., Plashchyn'ska A.V., Romanov O.V. Determining the Fatigue Life of Prismatic Bars under Uniaxial Asymmetric Tension-Compression // Int. Appl. Mech. – 2023. – **59**, N 5. – P. 585 – 594.
16. Gough H.J. The Fatigue of Metals. – London: Scott, Greenwood & Son, 1924. – 304 p.
17. Marin J. Mechanical behaviour of engineering materials. – New York: Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1967. – 189 p.
18. Maslov B.P. Nonlinear Hereditary Creep of Isotropic Composites of Random Structure // Int. Appl. Mech. – 2022. – **58**, N 1. – P. 75 – 90.

Надійшла 11.08.2023

Затверджена до друку 16.04.2024