

УДК 539.3

В.М. Пелих

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ЗА УМОВИ АСИМЕТРИЧНОГО РОЗТЯГНЕННЯ-СТИСНЕННЯ МЕТОДОМ ЕКВІВАЛЕНТНИХ НАПРУЖЕНЬ

The paper considers the problem of calculating the fatigue lifetime and creating the S-N curves of constructional aluminium alloys under high-cyclic asymmetric tension-compression loading. The solution is based on the equivalent stresses conception. Also, we calculate the lifetime of constructional aluminium alloys. Our results satisfactorily conform to the experimental data obtained. These methods can be further employed to calculate fatigue lifetime of any constructions' elements working under the asymmetric tension-compression.

Вступ

Елементи сучасних конструкцій та деталі механізмів у процесі експлуатації піддаються одночасній дії статичних і циклічних навантажень при одночасному напруженому стані. За таких умов при відносно невисоких температурах ($\theta < 0,5 - 0,6\theta_{пл}$) руйнування металевих матеріалів зазвичай настає внаслідок розвитку процесу втоми. Статична компонента при цьому істотно знижує опір втомі матеріалу і, відповідно, довговічність деталі чи конструкції в цілому. Тому актуальним є завдання врахування впливу асиметрії циклу напружень для випадку багатоциклової втоми, коли накопичення помітних макроскопічних деформацій відсутнє і руйнування відбувається миттєво.

Стаття присвячена дослідженню алюмінієвих сплавів, які широко використовуються в авіаційних, суднобудівних та інших конструкціях. Як правило, опір втомі конструкційних алюмінієвих сплавів та їх граничний стан при зазначених вище умовах здійснюють на основі експериментальних досліджень, огляд і аналіз яких наведено в [1–4].

Однак складність і значна трудомісткість, довга тривалість експериментальних досліджень, необхідних для оцінки характеристик опору втомі та побудови діаграм граничних амплітуд напружень, обумовили розроблення різних альтернативних методів пошуку емпіричних залежностей для їх визначення. Такі методи дають можливість із доволі високою точністю визначити граничний стан досліджуваних матеріалів при асиметричному циклічному навантаженні на основі емпіричних залежностей за результатами стандартних випробовувань на коротко-

тривалу міцність і втому при симетричному циклі навантаження. Найпоширенішими емпіричними залежностями для розрахунку діаграм граничних амплітуд напружень є лінійні, параболічні й еліптичні залежності [1–4]. Відомим фактом є те, що застосування тієї чи іншої залежності обмежене конкретним класом матеріалів або умовами навантаження. Майже не розвинуті або взагалі відсутні методики побудови повних кривих втоми, тобто оцінки опору втомі в широкому діапазоні довговічностей.

Ціль цієї роботи полягає в розробленні методу оцінки довговічності конструкційних алюмінієвих сплавів на основі запропонованих моделей граничного стану [5, 6], які дають можливість адекватно описувати їх опір втомі при асиметричному багатоцикловому навантаженні. Характерна риса конструкційних алюмінієвих сплавів полягає в тому, що їх міцність перебуває в широкому спектрі, що й зумовлює їх використання в різноманітних машинобудівних конструкціях. Різні властивості конструкційних алюмінієвих сплавів, з одного боку, й умови навантаження, з іншого, визначають їх різну чутливість до дії асиметрії навантаження, це й обумовлює необхідність удосконалення методів визначення їх опору втомі в умовах асиметричного навантаження.

Постановка задачі

Розглядається задача розрахункової оцінки довговічності конструкційних алюмінієвих сплавів в умовах асиметричного навантаження розтягненням-стисненням і побудови кривих втоми за параметром середнього напруження циклу за допомогою моделей граничного стану, які базуються на методі еквівалентних напружень [5, 6].

Вихідні співвідношення

Сферу застосування залежностей і співвідношень, що описують опір втомі досліджуваних конструкційних алюмінієвих сплавів при асиметричному циклічному навантаженні, охарактеризуємо таким чином. Прийmemo, що амплітудне значення напружень асиметричного циклу в процесі навантаження не змінюється. Будемо розглядати багатоциклову втому з високими частотами навантаження ($f > 10$ Гц) та довговічностями n_R більше 10^4 циклів. Конструкційні алюмінієві сплави досліджуються в діапазоні температур, за яких реологічні ефекти не проявляються, а опір статичному руйнуванню задається відповідною межею короткотривалої міцності.

Розв'язок задачі будується на основі концепції еквівалентних напружень, яка широко використовується в розрахунковій практиці та дає змогу зводити складні режими навантаження до простих. У нашому випадку концепція еквівалентних напружень полягає в приведенні асиметричного циклу навантаження до симетричного. Тобто вона зводиться до знаходження такої комбінації циклічного напруження σ_a і статичного напруження σ_m асиметричного циклу, дія якої за своїм руйнуючим впливом еквівалентна симетричному циклу з амплітудою σ_{eqv} . Така еквівалентність має на увазі одну й ту ж саму кількість циклів до руйнування n_R при навантаженні асиметричним циклом і еквівалентним йому симетричним циклом з амплітудою σ_{eqv} .

Загальний вигляд виразу для еквівалентних напружень, конкретизація якого буде залежати від вибраної моделі граничного стану, можна подати у такому вигляді:

$$\sigma_{eqv} = f(\sigma_a, \sigma_m, c_i) \quad i = \overline{1, k};$$

де c_i – константи матеріалу або коефіцієнти, які визначаються із базових експериментів.

Значення довговічності n_R можна розрахувати виходячи з рівняння кривої втоми при симетричному циклі навантаження

$$n_R = \frac{1}{C(\sigma_a)^q} \Rightarrow n_R = \frac{1}{C(\sigma_{eqv})^q}, \quad (1)$$

де C , q – коефіцієнти, що визначаються за результатами обробки експериментальних даних на втому при симетричному циклі навантаження і характеризують криву втоми матеріалу в цих умовах навантаження.

Формування структури еквівалентних напружень σ_{eqv} безпосередньо пов'язане зі встановленням аналітичного виразу, що характеризує залежність між величинами σ_m і σ_a . Такий вираз має описувати діаграму граничних амплітуд напружень у площині σ_m – σ_a й адекватно відображати експериментальні дані. Але, як зазначено раніше, використання відомих залежностей для цієї мети призводить у багатьох випадках до значних похибок. Таким чином, розв'язання задачі пов'язане з необхідністю побудови таких моделей, які адекватно описують експериментальні дані та дають можливість розрахунковим шляхом будувати діаграми граничних амплітуд напружень при асиметричному циклічному навантаженні.

У працях [5, 6] запропоновано й апробовано моделі, що задаються у вигляді степеневі функції косинуса й арккосинуса

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

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

Ці структури моделей граничного стану виявились доволі гнучкими, оскільки описують велику різноманітність форм діаграм граничних амплітуд напружень залежно від показників степеня, які, по суті, є параметрами моделей, що визначаються з базового експерименту. Вони практично відображають вплив статичної компоненти циклу навантаження на граничний стан матеріалу та визначають форму діаграм граничних амплітуд напружень.

Рівняння (2) та (3) точно задовольняють граничні умови, а саме, коли $\sigma_m = 0$, руйнування відбувається внаслідок втоми матеріалу. В тому випадку, коли $\sigma_a = 0$, руйнування настає через втрату статичної міцності.

Величини σ_B і σ_n визначаються за результатами стандартних досліджень зразків матеріалу на короткотривалу міцність і на втому при симетричному циклі відповідно. Коефіцієн-

ти λ та ξ розраховуються за даними додаткового одиничного базового експерименту при віднульовому циклі навантаження.

Після нескладних математичних перетворень рівнянь (2) та (3) для визначення λ і ξ отримаємо, відповідно, вирази такого вигляду:

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_a^0 - \lg \sigma_n^0}{\lg \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m^0}{2 \sigma_B} \right) \right]}$$

та

$$\xi = \frac{\lg \left[\cos \left(\frac{\sigma_a^0}{\sigma_n^0} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right]}{\lg \sigma_m^0 - \lg \sigma_B},$$

де σ_m^0 , σ_a^0 – статична та циклічна компоненти віднульового циклу відповідно; σ_n^0 , σ_B – обмежена межа витривалості при симетричному циклі, що відповідає довговічності при віднульовому циклі, і межа короткотривалої міцності відповідно. Для врахування впливу статистичних властивостей досліджуваних матеріалів та більш надійного визначення коефіцієнтів λ і ξ можна дослідити кілька ідентичних зразків при вибраній комбінації компонент навантаження.

При асиметричному навантаженні еквівалентне напруження σ_{eqv} відображає різні комбінації середнього напруження σ_m й амплітуди циклічного напруження σ_a асиметричного циклу при одній і тій самій кількості циклів до руйнування n_R , які відповідають межі обмеженої витривалості σ_n при симетричному циклі навантаження.

Із врахуванням цього структуру співвідношень для еквівалентного напруження на основі моделей граничного стану (2), (3) можна представити такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_a}{\sigma_n} &= \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^\lambda \Rightarrow \\ \Rightarrow \sigma_n &= \sigma_a \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^{-\lambda} = \sigma_{eqv} \end{aligned} \quad (4)$$

та

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_a}{\sigma_n} &= \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right] \Rightarrow \\ \Rightarrow \sigma_n &= \sigma_a \cdot \frac{\pi}{2} \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right]^{-1} = \sigma_{eqv}. \end{aligned} \quad (5)$$

Розклавши функції косинуса й арккосинуса в ряд та обмежившись двома членами ряду, отримаємо із рівнянь (2) і (3) вирази для наближених оцінок

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_a}{\sigma_n} &= \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 \right]^{2\lambda} \quad \text{та} \\ \frac{\sigma_a}{\sigma_n} &= \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right] = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Вирази для еквівалентних напружень із врахуванням (6) набувають такого вигляду:

$$\sigma_{eqv} = \sigma_a \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 \right]^{-\lambda} \quad (7)$$

та

$$\sigma_{eqv} = \sigma_a \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right]^{-1}. \quad (8)$$

Опір втомі конструкційних алюмінієвих сплавів

Розрахунки довговічності та побудову кривих втомі виконано й апробовано з використанням запропонованих моделей стосовно деформованих конструкційних алюмінієвих сплавів BS1476 HE10WP та BS1476 HE20WP, які за класифікацією [2] належать до сплавів середньої міцності, і сплаву підвищеної міцності – Д16Т [7].

Досвід використання розробленого методу показав, що вибір залежності (2) або (3) для розрахунку еквівалентних напружень багато в чому визначається механічними властивостями матеріалу, і перш за все рівнем його пластичності. Встановлено, що адекватний опис результатів досліджень на втому і, відповідно, можливість коректних розрахункових оцінок довговічності умовно пластичних матеріалів

(леговані та вуглецеві сталі, сталі середньої міцності) забезпечують вирази (4) і (7), тоді як для умовно крихких матеріалів (чавуни, нікелеві сплави, високоміцні сталі) – залежності (5) і (8).

Пластичність конструкційних алюмінієвих сплавів, що досліджуються, перебуває приблизно на одному рівні ($\delta = 12 - 14\%$). В цьому випадку використання критерію δ для вибору моделі при розрахунку довговічності через показники пластичності, як засвідчив аналіз розрахунків, веде до невизначеності. Тому критерієм для вибору моделі при розрахунках довговічності більш ефективним є використання співвідношення між межею текучості σ_{τ} і ме-

жею міцності σ_B . При $\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_B} = 0,4 - 0,6$ найкращі результати дає використання виразу (4) або (7), а при $\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_B} = 0,91 - 0,94$ – виразу (5) або (8).

Для інтервалу $\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_B} = 0,6 - 0,91$ розрахунок крихких втоми проведений як за виразом (4), так і за виразом (5), задовільно узгоджується з експериментальними даними.

На рисунку як приклад представлені результати розрахунку довговічності та побудови кривих втоми конструкційних алюмінієвих сплавів BS1476 HE10WP (а), BS1476 HE20WP

(б) [2] та Д16Т (в) [7]. Гладкі циліндричні зразки конструкційних алюмінієвих сплавів досліджувались в умовах симетричного циклу навантаження розтягненням-стисненням. Прямою суцільною лінією нанесена апроксимаційна крива втоми матеріалу, дослідженого в цих умовах, пунктиром і штрих-пунктиром – розрахункові криві втоми при асиметричному навантаженні з використанням точних виразів (4) та (5) відповідно. Точки – дані експерименту при асиметричному навантаженні.

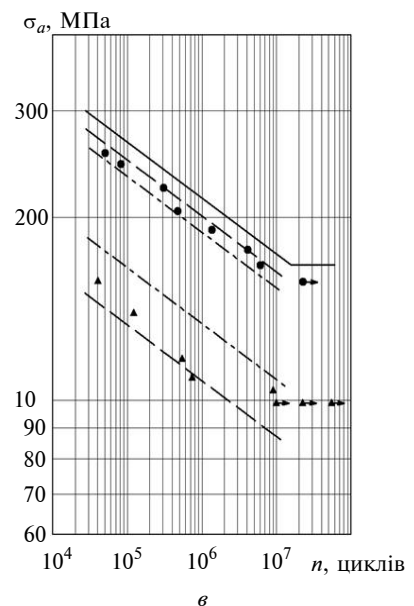
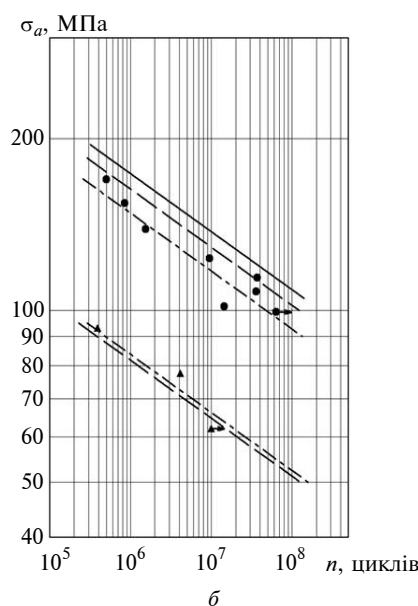
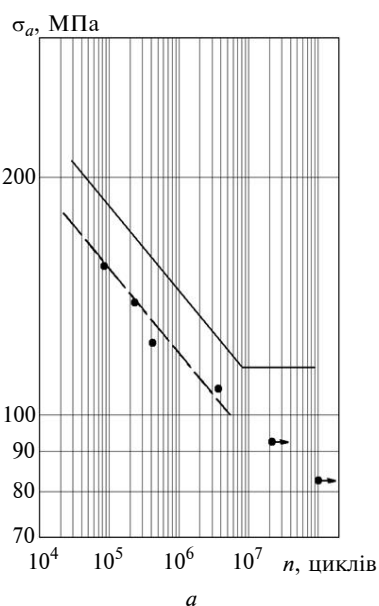
З рисунка, а видно, що розрахункові криві втоми при асиметричному розтягненні-стисненні за виразами (4) та (5) повністю збігаються і адекватно узгоджуються з експериментальними даними. Це зумовлено тим, що

співвідношення $\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_B}$ для цього випадку набуває

значення 0,86, яке потрапляє в зазначений вище інтервал. На рисунку, б відображається той факт, що розрахункові криві втоми теж адекватно описують результати експерименту. Однак в цьому випадку доцільнішим для розрахунку є використання виразу (5), оскільки

співвідношення $\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_B}$ набуває значення 0,91,

яке перебуває на межі зазначеного вище інтервалу. Криві втоми, наведені на рисунку, в, розраховані з використанням виразу (4) – в цьому випадку його вибір обумовлений зна-



Криві втоми алюмінієвих сплавів BS1476 HE10WP (а), BS1476 HE20WP (б) і Д16Т (в) при 20 °С: а – $\sigma_m = 77,2$ (●) МПа; б – $\sigma_m = 88,8$ (●), 270,3 (▲) МПа; в – $\sigma_m = 98,1$ (●), 294,3 (▲) МПа

Таблиця. Механічні властивості конструкційних алюмінієвих сплавів і значення коефіцієнтів λ , ξ , C , q

Найменування сплаву	σ_B , МПа	σ_{τ} , МПа	$\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_B}$	λ	ξ	q	C	Джерело
BS1476 HE10WP	308,9	266,4	0,86	2,31	0,97	9,352	$6,622 \cdot 10^{-27}$	[2]
BS1476 HE20WP	367,6	332,8	0,91	0,83	1,04	9,838	$9,354 \cdot 10^{-29}$	[2]
Д16Т	529,7	360,0	0,68	1,57	0,98	10,852	$4,797 \cdot 10^{-32}$	[7]

ченням співвідношення $\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_B} = 0,68$, яке майже перебуває на іншій межі зазначеного вище інтервалу.

Таблиця містить механічні характеристики досліджуваних конструкційних алюмінієвих сплавів, запозичених з першоджерел, та коефіцієнти, що використовувались у розрахунках і є матеріальними константами: значення коефіцієнтів λ і ξ , які визначались з одиничного базового експерименту, та C і q , що розраховувались за результатами досліджень на втому при симетричному циклі навантаження.

Аналіз інформації, поданої на рисунку, свідчить про задовільне узгодження розрахункових кривих втоми з експериментом та засвідчує можливість використання запропонованого методу для оцінки довговічності конструкційних алюмінієвих сплавів в умовах осьового асиметричного навантаження.

Завдяки великій кількості досліджень опору втомі в межах $n_R = 10^4 - 5 \cdot 10^7$ встановлено, що статична складова частини циклу навантаження знижує опір втомі та зміщує криві втоми по осі ординат при симетричному циклі в системі координат $\lg \sigma_a - \lg n$ відносно кривої втоми при симетричному циклі. При цьому практично не змінюється нахил кривих втоми (показник q в рівнянні (2)) і координати їх перегину n_0 [8]. Це дає можливість розглядати криву втоми при симетричному циклі як базу, відносно якої можлива оцінка впливу асиметрії. Однак використання цього підходу, при якому, маючи криву втоми при симетричному циклі навантаження і параметри моделей граничного стану λ або ξ , можливий розрахунок кривих втоми при різних значеннях статичної складової частини циклу σ_m , має деякі обмеження. Вони зумовлені перш за все природою досліджуваного матеріалу та його чутливістю до асиметрії навантаження. Для низки матеріалів у процесі багаточислового навантаження характерним є прояв структурних змін, фазових пе-

ретворень тощо. В цьому випадку нахил кривих втоми при асиметричному навантаженні може змінюватися порівняно з симетричним. Якщо ця зміна нахилу доволі значна, то запропонований метод побудови кривих втоми при асиметричному циклічному навантаженні не забезпечує необхідної точності і потребує додаткових досліджень.

Проектування елементів конструкцій, що піддаються дії циклічних навантажень в процесі експлуатації, потребує інформації про характеристики опору втомі вибраних конструкційних матеріалів.

Висновки

На сьогодні практично відсутні методи розрахункової оцінки довговічності побудови кривих втоми при асиметричному циклі з використанням мінімального обсягу експериментальної інформації. Більшість підходів і методів, альтернативних експериментальним дослідженням, обмежені прогнозуванням межі витривалості та виключають можливість надійної оцінки опору втомі в широкому діапазоні довговічностей.

Запропонований метод дає змогу з використанням мінімального обсягу досліджень розрахувати довговічності при асиметричному циклічному навантаженні та побудувати криві втоми.

Метод базується на використанні концепції еквівалентних напружень і дає можливість звести дію компонентів асиметричного циклу до дії еквівалентної амплітуди напружень симетричного циклу, якому відповідає та сама довговічність, що і для асиметричного. Як початкові дані в запропонованому методі оцінки довговічності та побудови кривих втоми при асиметричних циклах навантаження використовуються характеристики кривої втоми при симетричному циклі і матеріальні константи, які визначаються з одиничного базового експерименту при асиметричному віднольовому циклі. Вибір моделі для розрахунку кривої втоми базується на врахуванні співвідношення між межею течучості σ_{τ} і межею міцності σ_B .

Метод перевірено при розрахунку кривих втоми за параметром середнього напруження циклу навантаження для деяких конструкційних алюмінієвих сплавів. Отримано задовільне узгодження розрахунку з експериментом, що дає можливість рекомендувати його для оцінки довговічності конструкційних алюмінієвих сплавів і побудови кривих втоми для випадку багаточислового асиметричного навантаження при мінімальному обсязі експериментальних досліджень.

Цю методику можна в подальшому використовувати для визначення довговічності еле-

ментів конструкцій літакобудівної та суднобудівної промисловості, а також при розрахунку довговічності елементів конструкцій будівель і радіоантен в умовах асиметричного розтягнення-стиснення, виготовлених з конструкційних алюмінієвих сплавів.

У перспективі дослідження розвиватимуться в напрямі визначення довговічності конструкційних алюмінієвих сплавів за умови двовісного асиметричного циклічного навантаження за методом еквівалентних напружень.

1. *Гаф Г. Дж.* Усталость металлов: Пер. с англ. – М.; Л.: Гл. ред. лит. по черной металлургии. – 1935. – 304 с.
2. *Форрест П.* Усталость металлов / Пер. с англ. под ред. С.В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
3. *Хэйвуд Р.Б.* Проектирование с учетом усталости / Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР И.Ф. Образцова. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
4. *Сопrotивление* материалов деформированию и разрушению: Справ. пособие. Ч. 2 / Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В. и др. – К.: Наук. думка, 1994. – 704 с.
5. *Голуб В.П., Крижановский В.И., Погребняк А.Д.* Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Прикл. механика. – 2004. – **40**, № 11. – С. 106–116.
6. *Голуб В.П., Крижановский В.И., Погребняк А.Д., Кочеткова Е.С.* Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном растяжении-сжатии // Прикл. механика. – 2006. – **42**, № 1. – С. 48–58.
7. *Сочава А.И.* Исследование влияния постоянной составляющей цикла на выносливость сплава Д16Т при осевых нагружениях // Изв. вузов. – М.: Машиностроение. – 1975. – № 12. – С. 39–42.
8. *Почтенный Е.К.* Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
20 вересня 2011 року