

УДК 621.539.432:629.73-03(046)

DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17626

I. В. СЕМАК¹, М. М. РЕГУЛЬСЬКИЙ², Г. М. БОРОЗЕНЕЦЬ¹Національний авіаційний університет, Київ, Україна²Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА УМОВ АСИМЕТРИЧНОГО ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В роботі виконано аналіз стандартних методик випробування на втомну міцність зразків конструкційних матеріалів за умов асиметричного циклічного навантаження. Показано, що втомні випробування конструкційних матеріалів є трудомісткими та довготривалими. Результати досліджень можуть бути використані для розробки стандарту на методи випробування зразків на втому конструкційних матеріалів за умов асиметричного циклічного навантаження, що дозволить значно зменшити обсяг експерименту, необхідного для визначення характеристик опору втомі при асиметричному циклічному навантаженні.

Ключові слова: конструкційні матеріали; аналіз стандартних методик; діаграми граничних напружень; криві втомної міцності; скорочення обсягу експериментальних досліджень.

Вступ. Механічні властивості конструкційних матеріалів, призначених для виготовлення несучих конструкцій, складають показники якості цих матеріалів. У зв'язку з цим визначення характеристик міцності, довговічності і пластичності конструкційних матеріалів рівнозначно визначенню їх показників якості.

Найбільш важливими характеристиками міцності, довговічності і пластичності конструкційних матеріалів для несучих конструкцій є границя статичної короткочасної міцності, границя довготривалої міцності, ударна в'язкість, повздовжнє видовження, границя повзучості і границя витривалості. Остання характеристика особливо важлива, оскільки переважно більшість транспортних несучих конструкцій, а також деталей різного типу двигунів, енергетичних установок, технологічного обладнання у металообробній промисловості знаходяться в експлуатації під дією змінних навантажень циклічного характеру. Останній тип навантажень у багатьох випадках з метою моделювання режиму навантаження у лабораторних умовах зводиться до циклічного навантаження з асиметрією або без асиметрії циклу.

Таким чином, удосконалення нормативної бази, необхідної для забезпечення експериментальних досліджень втомі матеріалів і конструкцій потребує подальших досліджень, які мають на меті перегляд існуючих та розробку нових стандартів, методичних рекомендацій та інших керівних документів у цій важливій сфері досліджень. Стандарти на основні методи механічних випробувань конструкційних матеріалів складають основу їх сертифікаційного базису. Особливо це стосується авіабудування.

Авіабудування – відповідальна і високотехнологічна сфера промислового виробництва, яку важко уявити без сертифікації матеріалів для несучих конструкцій, які застосовуються в авіації. Це пов'язано з високими вимогами до безпеки та надійності, а також можливістю успішного виходу на міжнародний ринок авіаційної техніки та авіаперевезень. В свою чергу, отримання сертифікатів різних видів для об'єктів авіаційної техніки базується саме на сертифікації матеріалів і агрегатів, які

входять до об'єктів авіаційної техніки. У зв'язку з цим, одним з основних завдань забезпечення якості авіаційної техніки є постійне підвищення її надійності та збільшення ресурсу, що може бути досягнуто тільки за умов використання якісних матеріалів і комплектуючих. Виконання цього завдання потребує наявності відповідної бази для організації різних видів випробувань, серед яких важливе місце займають випробування на міцність зразків матеріалів, напівфабрикатів, елементів конструкцій і конструкцій в цілому.

Випробування на міцність зразків матеріалів, як правило, значною мірою забезпечені нормативною базою, тому в багатьох випадках їх називають «стандартними випробуваннями зразків матеріалів». Частіше за все, під цим розуміють статичні випробування на розтягання або стиск з побудовою діаграм деформування, випробування на втому, визначення твердості, ударної в'язкості і деякі інші. Випробування на міцність конструктивних елементів, в цілому потребує розробки спеціальних нормативних документів, що регламентують процедури проведення таких випробувань з урахуванням особливостей конкретного виду техніки, яка виробляється на даному підприємстві. Це, як правило, різні методики і методичні рекомендації та стандарти підприємств. Розробка таких документів необхідна для атестації і в разі потреби акредитації випробувальних лабораторій підприємств, що становить одну з необхідних умов сертифікації системи управління якістю авіапідприємства.

Таким чином, розробка нормативних документів, що стосуються визначення показників міцності та довговічності відповідальних елементів несучих конструкцій, значною мірою забезпечує, як ефективність розробки зразків нової авіаційної техніки, так і проведення її подальшої сертифікації [1–3, 5–7].

Аналіз методів визначення характеристик втомної міцності. Методи визначення характеристик втомної міцності діляться на дві великі групи:

– *прямі методи*, які в свою чергу поділяються на ті що використовують велику (багато зразків) та малу (мало зразків) кількість зразків;

– *непрямі методи*, що дозволяють встановлювати границю втомної міцності та положення лівої частини кривої втоми, лінії пошкодження і зміцнення або ж тільки визначати границю втоми в статистичному або нестатистичному аспектах.

Використання прискорених методів з малою кількістю зразків та оцінка втомної міцності з непрямих характеристик (кореляційні зв'язки, непружні характеристики, фіксація зміни деяких фізичних властивостей та ін.) рекомендуються для оцінки та порівняння, але не для паспортних випробувань.

Існують методики випробування металів на втому при таких видах деформування та умовах [4–7]:

- при розтяганні-стисканні, згинанні та крученні;
- при симетричних та асиметричних циклах напружень;
- при відсутності і наявності концентраторів напружень;
- при нормальній температурі;
- в малоциклічній пружній та пружно-пластичній зонах;
- на втому деталей, вузлів, зварних, заклепкових, пресових та інших з'єднань;
- на ударну, контактну та термічну втому;
- з попередніми напруженнями (деформаціями) циклу;
- в умовах підвищених та понижених температур;
- в умовах корозійного та променевого впливу.

За результатами випробувань на втому:

- будують криву втоми і визначають границю витривалості;
- будують криву втоми в малоциклічній пружно-пластичній зоні;
- будують криву втоми за параметром ймовірності руйнування;
- визначають границю витривалості для заданого рівня ймовірності руйнування;
- визначають середнє значення та середнє квадратичне відхилення логарифму довговічності на заданому рівні напружень або деформацій;
- визначають середнє значення та середнє квадратичне відхилення границі витривалості;
- будують діаграми граничних напружень в межах амплітуд.

Основними критеріями руйнування при визначенні границі витривалості і побудові кривих втоми є повне руйнування (розділення зразка на дві частини) або поява макротріщин довжиною близько 0,5 – 1,0 мм.

При випробуваннях зразків допускається як м'яке, так і жорстке навантаження. В межах прийнятої серії випробувань всі зразки навантажують по одному із вказаних способів і випробовують на однотипних машинах. Випробування зразків повинно проводитись безперервно до заданої стадії руйнування або базового числа циклів. В процесі випробувань зразків контролюється стабільність максимальних та мінімальних значень навантажень, що задаються.

Випробування серії однакових зразків при асиметричних циклах повинно проводитись при однакових для всіх зразків середніх напруження циклу або значеннях коефіцієнту асиметрії.

Випробувальні машини перетворюють зовні отриману енергію в енергію деформації зразка. Машини класифікують за методом відтворення силосбудження. В машинах для випробувань на втому застосовують такі методи силосбудження:

- механічний, оснований на використанні важільних, ексцентрикових, інерційних і комбінованих механізмів;
- гідравлічний, оснований на використанні енергії стиснутої рідини;
- пневматичний заснований на використанні енергії стиснутого газу;
- електричний (електромагнітний, електродинамічний, магнітострикційний).

Результати досліджень та їх аналіз. Аналіз стану досліджень опору втомі за умов асиметричного циклічного навантаження свідчить про необхідність проведення експериментальних робіт у цьому напрямку.

Більша частина результатів про втому була отримана з випробувань при симетричному циклі навантаження, коли середнє напруження циклу дорівнює нулю. Великою мірою це обумовлено тим, що найбільш легко при випробуваннях реалізувати схему навантаження консольним згинанням з обертанням зразка. Машини на яких проводяться такі випробування не дозволяють реалізувати випробування зі статичною складовою. Однак багато різних типових деталей машин і елементів конструкцій знаходяться в експлуатації саме під дією циклічного навантаження із статичною складовою. Зважаючи на це, дослідження характеристик опору втомі конструкційних матеріалів за умов циклічного асиметричного навантаження є актуальним і перспективним.

Для представлення і опису результатів випробувань на втому при асиметричному циклічному навантаженні різними дослідниками було запропоновано багато залежностей, переважна більшість яких має емпіричний

характер і у багатьох випадках описують результати випробувань на рівні аналітичних апроксимацій. Найбільш відомими із згаданих вище залежностей є наступні [4, 8, 9]:

модифікована умова Гудмана

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{\text{вр}}} \right); \quad (1)$$

умова Гербера

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{\text{вр}}} \right)^2 \right]; \quad (2)$$

умова Зодерберга

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_t} \right), \quad (3)$$

На рис. 1 показано розташування відповідних кривих, побудованих за співвідношеннями (1-3).

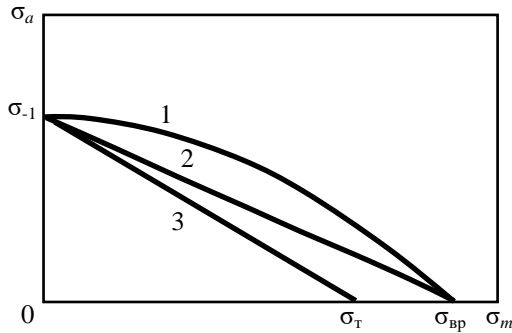


Рис. 1. Залежність змінного напруження від статичного напруження або діаграма $\sigma_a - \sigma_m$: 1 – парабола Гербера; 2 – видозмінена лінія Гудмана; 3 – лінія Зодерберга.

Слід відмітити, що залежності такого типу у більшості випадків не можуть адекватно описати діаграму граничних амплітуд напружень у широкому діапазоні груп конструкційних матеріалів. Для опису діаграм конкретного матеріалу необхідно підбирати одну з вищенаведених залежностей.

В роботі [8, 9] запропоновано модель граничного стану до якої входять константи матеріалу, яка може задовільно описати діаграму граничних амплітуд і напружень. Удосконалення нормативної бази, необхідної для забезпечення експериментальних досліджень втомних матеріалів і конструкцій потребує подальших досліджень, які мають на меті удосконалення існуючих і розробку нових стандартів, методичних рекомендацій у цій сфері досліджень.

Основні вимоги до організації і проведення випробувань на втому зразків конструкційних матеріалів сформульовані у стандартах. [5 - 7]:

В останні роки технічними комітетами та іншими суб'єктами стандартизації ведеться активна діяльність, спрямована на перегляд нині діючих стандартів, їх гармонізацію, а також створення нових стандартів в цьому напрямку. Розробка нормативного забезпечення на методи випробувань на втому входить у сферу діяльності таких технічних комітетів України, як ТК 81 «Стандартизація методів

механічних, металографічних та корозійних випробувань», а також ТК 68 «Надійність техніки».

Розрахунок граничного стану при асиметричному циклічному навантаженні. Граничний стан матеріалу визначається побудовою діаграми граничних амплітуд напружень за параметром базового числа циклів до руйнування.

Розглянемо моделі граничного стану розроблені для побудови діаграм граничних амплітуд напружень виконаних у роботах [8 - 9] для алюмінієвих сплавів, які широко застосовуються в авіабудуванні. Широке застосування цих сплавів має місце завдяки їх досить великій міцності, малій питомій вазі, високій корозійній стійкості. В авіаційній промисловості їх використовують для виготовлення відповідальних елементів як лонжерони, обшивка фюзеляжа, шпангоути та інші.

Умови роботи деталей та вузлів авіаційних конструкцій під час експлуатації характеризуються комплексним навантаженням, яке включає в себе комбінацію статичних і змінних циклічних навантажень.

Оцінка граничного стану матеріалів здійснюється на базі ізохронних діаграм граничних напружень. Побудову таких діаграм виконують, за звичай за результатами експериментальних досліджень. Для опису таких діаграм частіше за все застосовують лінійні або параболічні залежності.

Аналіз експериментально отриманих діаграм свідчить про широкий спектр форм таких діаграм і тому вказані вище залежності не забезпечують досить коректних розрахункових оцінок міцності досліджуваних матеріалів.

У роботі [8] запропонована і апробована залежність між компонентами асиметричного циклу навантажень на базі ступеневі трансцендентної функції, яка дозволяє описувати усі відомі форми діаграм граничних напружень. Розглянемо, як цей метод розповсюджено на вирішення задач розрахунку і прогнозування втомної міцності алюмінієвих сплавів за умов асиметричного розтягання-стиску, що дуже часто є характерним для реальних умов експлуатації авіаційних конструкцій. Вирішення задач проводиться в діапазоні багатоциклової втоми ($f \geq 10$ Гц, $n_R \geq 10^4 \div 10^5$ циклів), коли максимальне напруження циклу не перевищує макроскопічну границю текучості матеріалу.

Для вирішення задачі скористаємось моделями граничного стану, які встановлюють залежність між руйнуючими статичними σ_m і циклічними σ_a напруженнями за параметром довговічності n_R .

Розглянемо модель граничного стану на основі функції \cos . Рівняння граничного стану для цієї моделі має вигляд:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^\lambda \Rightarrow \frac{\sigma_a}{\sigma_n} - \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right) \right]^\lambda = 0 \quad (4)$$

де σ_n – границя витривалості при симетричному циклі; σ_B – границя статичної міцності; λ – показник степені у рівнянні моделі, який показує коефіцієнт чутливості до асиметрії циклу навантаження. Рівняння (4) задовольняє граничні умови, які відповідають втомній міцності при симетричному циклі, а саме $\sigma_a = \sigma_n$ і границі міцності при короткочасному статичному навантаженні при $\sigma_m = 0$ і $\sigma_m = \sigma_B$ при $\sigma_a = 0$.

Розкладемо функцію \cos в ряд. В цьому випадку, обмежуючись трьома членами розкладання виразу (4) отримаємо наближену оцінку:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 \right]^{\lambda} \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right)^{\xi} + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 - \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 = 1, \quad (5)$$

А обмежуючись двома членами ряду –

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 \right]^{\lambda} \Rightarrow \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right)^{1/\lambda} + \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

Розглянемо модель граничного стану на основі функції \arccos . У цьому випадку рівняння граничного стану має вид:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\xi} \right] \Rightarrow \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right) - \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\xi} \right] = 0 \quad (7)$$

де показник $\xi \cong 1/\lambda$.

Рівняння (7) задовольняє граничним умовам, а саме $\sigma_a = \sigma_n$ при $\sigma_m = 0$, $\sigma_m = \sigma_B$ при $\sigma_a = 0$.

Розклавши функцію \arccos в ряд і виконавши над виразом (7) операції, аналогічні тим, що виконувались над виразом (4), отримуємо наступні наближені співвідношення:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\xi} + \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{3\xi} = 1 \quad (8)$$

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n} \right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\xi} = 1 \quad (9)$$

Похибки точних і наближених оцінок граничного стану подалі оцінюються на основі порівняння результатів розрахунків з даними експериментальних досліджень.

Розглянемо визначення матеріальних констант. Застосування означених вище моделей граничного стану потребує визначення з допомогою експерименту трьох характеристик матеріалу: границі статичної короткочасної міцності матеріалу σ_B , границі обмеженої витривалості при симетричному циклі навантажень σ_n і коефіцієнтів чутливості до асиметрії циклу λ або ξ , які можна трактувати як константи матеріалу.

Величини σ_B і σ_n визначають на основі стандартних випробувань циліндричних зразків на статичну короткочасну міцність та втому відповідно. Ці дані є довідковими і складають механічні властивості матеріалу за умов статичного і циклічного навантаження.

Величина σ_B , за умов одновісного розтягання, визначається за діаграмою розтягу « $\sigma - \epsilon$ ». Для отримання значень границі обмеженої витривалості σ_n необхідно побудувати криву втоми за результатами випробувань при симетричному циклі навантажень і скориставшись методом найменших квадратів отримати коефіцієнти або параметри рівняння побудованої кривої втоми. При степеневому представленні кривої втоми маємо:

$$n_R = \frac{1}{C(\sigma_n)^q} \Rightarrow \sigma_n = \left(\frac{1}{C n_R} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (10)$$

де Ciq – коефіцієнти рівняння кривої втоми.

Коефіцієнти λ і ξ визначають із додаткового одиничного експерименту при від нульовому асиметричному циклі навантаження ($\sigma_m = \sigma_a$). Використовуючи вирази (4) (7), отримуємо для коефіцієнтів λ і ξ вирази:

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_a^0 - \lg \sigma_{-1}^0}{\lg \left[\cos \left(\frac{\pi \sigma_m^0}{2 \sigma_B^0} \right) \right]} \quad \text{і} \quad \xi = \frac{\lg \frac{\sigma_a^0}{\sigma_{-1}^0} - \lg \frac{2}{\pi}}{\lg \left[\arccos \left(\frac{\sigma_m^0}{\sigma_B^0} \right) \right]} \quad (11)$$

В виразах (10; 11) маємо σ_a^0 , σ_m^0 – амплітуда і середнє напруження від нульового у базовому одиничному експерименті; σ_{-1}^0 – границя обмеженої витривалості при симетричному циклі n_R^0 . Під одиничним експериментом розуміють експеримент, який проводиться при одному фіксованому рівні σ_m^0 і σ_a^0 . З метою урахування впливу статистичних властивостей на цьому рівні навантажень може бути випробувано кілька ідентичних зразків.

Значення коефіцієнтів λ і ξ визначають форму діаграм граничних амплітуд напружень і таким чином, вибір відповідної моделі для оцінки граничного стану досліджуваного матеріалу.

Розглянемо задачу розрахунку граничних напружень асиметричного циклу для зразків із алюмінієвих сплавів за умов однобічного розтягання-стиску та згинання.

У дослідженні [8] розрахунки діаграм граничних амплітуд напружень виконано для 20-ти марок алюмінієвих сплавів. По відношенню до деяких з них варіювався хімічний склад, режими термообробки, технологія виготовлення, що розширило кількість об'єктів дослідження. Умовно вони поділені на три групи Критерієм такого поділу були границя міцності і пластичні властивості. До першої групи віднесені сплави з високою міцністю з границею міцності

$\sigma_e = 480-580$ МПа і видовженням $\delta = 12 \div 15\%$; до другої групи – сплави середньої міцності з границею міцності $\sigma_e = 360-470$ МПа і видовженням

$\delta = 15-20\%$ і до третьої групи – сплави низької міцності з границею міцності $\sigma_e = 170 - 310$ МПа і видовженням $\delta = 20 - 35\%$.

Основні розрахункові співвідношення. Рівняння (4 - 6, 7 - 9) зв'язують між собою три змінні: амплітуди руйнуючих напружень σ_a , статичну складову σ_m та число циклів до руйнування n_R . Враховуючи рівняння (5 - 6, 8 - 9), визначають напруження σ_a , за умови, що σ_m і n_R задані. Рішення (5 - 8) приймаються такі, що практично збігаються з рішеннями (4) і (7) відповідно. У цьому випадку, виходячи із моделей граничного стану (4) і (5), із врахуванням виразу (10) отримаємо вирази для амплітуди циклічних напружень:

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{C n_R} \right)^{\frac{1}{q}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_B} \right)^4 \right]^{\lambda} \quad (12)$$

та

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{Cn_R} \right)^{\frac{1}{q}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2\sigma_B} \right)^2 \right]^{\lambda} \quad (13)$$

Використовуючи моделі граничного стану (8) і (9) можна визначити вирази для амплітуди циклічного напруження з урахуванням (10), які мають наступний вигляд:

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{Cn_R} \right)^{\frac{1}{q}} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\xi} - \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{3\xi} \right] \quad (14)$$

та

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{Cn_R} \right)^{\frac{1}{q}} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{\xi} \right] \quad (15)$$

Нижче наведено графіки побудовані за допомогою співвідношень (12 -15), діаграми граничних амплітуд напружень для алюмінієвих сплавів.

Розрахунки діаграм граничних амплітуд напружень. Для групи алюмінієвих сплавів високої міцності розраховані і побудовані діаграми для сплавів Д16Т, ВД17, 24S-T, 75S-T6, BS1476.

На рис. 2, зіставлені результати розрахунків (лінії) з експериментальними даними (точки) для сплавів високої міцності.

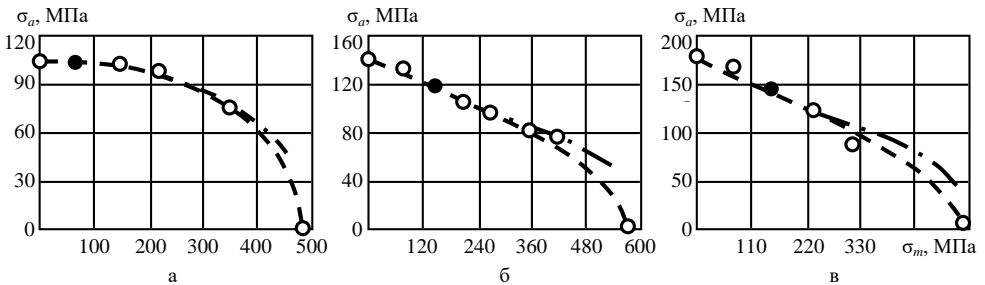


Рис. 2. Діаграми граничних амплітуд напружень для сплавів 2014-T6 (а), 7075-T6 (б) і BS1476 (4% Cu) (в).

Штрихові лінії на рисунку відображують розрахунки з використанням залежності (5), штрих пунктирні – залежності (6). Темні точки характеризують комбінацію статичних і циклічних напружень від нульового, або близького до нього циклу навантаження, що використовується для визначення коефіцієнтів λ і ξ . Розрахунки виконані для довговічностей $5 \cdot 10^8$ циклів (а, б) і $5 \cdot 10^7$ циклів (в). Значення границь міцності σ_B і пластичності σ_Y , коефіцієнтів λ і ξ , використаних в розрахунках граничного стану сплавів даної групи, наведено в таблиці 1.

Друга група алюмінієвих сплавів – середньої міцності – включала сплави Д16Т, АК4, АК4-1, АМг-6, BS1476 (1% Mg, 0,6% Si). На рис. 3 наведені результати розрахунків (лінії) з експериментальними даними (точки) для сплавів середньої міцності. Розрахунки виконані для довговічностей $n_R = 10^5$ та $2 \cdot 10^7$ (а), $n_R = 10^7$ (б) і $n_R = 5 \cdot 10^7$ циклів (в).

Наведені вище розрахунки діаграм показали задовільне узгодження з експериментальними даними. Ступінь точності, яка оцінюється величиною похибки δ , залежить від матеріалу, структури моделі граничного стану, умов реалізації одиничного базового експерименту.

Таблиця 1

Значення характеристик міцності сплавів і коефіцієнтів форми діаграм.

Сплав	σ_B , МПа	σ_Y , МПа	λ	ξ
2014-T6	481	-	0,29	2,64
7075-T6	564	489	1,09	1,10
BS1476 (4% Cu)	541	387	2,23	0,92
Д16Т	425	274	1,70	1,05
АК4-1	391	297	2.20	0,84
BS1476 (1% Mg, 0,6% Si)	362	328	1,02	1,21
52S-36	269	-	0,36	2,33
6061-T6	310	-	0,66	1,72
BS1477 (4% Mg)	307	177	0,96	0,76

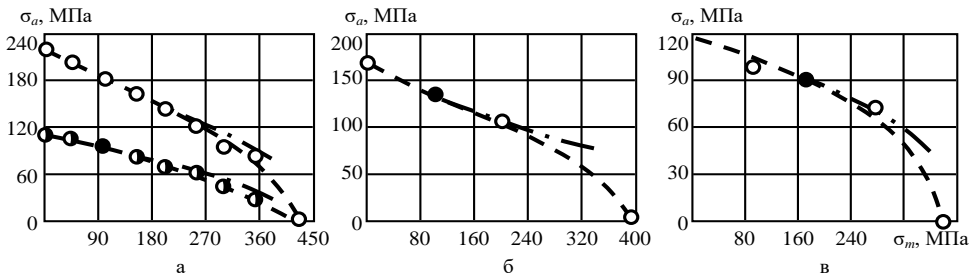


Рис. 3. Діаграми граничних напружень для сплавів Д16Т (а), АК4-1 (б) и BS1476 (в)

На рис. 4 представлені результати розрахунків (лінії) з експериментальними даними (точки) для сплавів низької міцності.

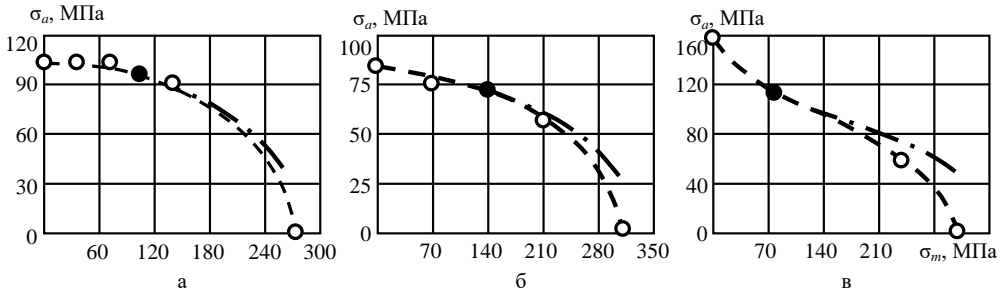


Рис. 4. Діаграми граничних напружень для сплавів низької міцності 52S-36 (а), 6061-T6 (б) и BS1477 (4% Mg) (в)

Аналіз експериментальних даних показав відносно невелику чутливість деяких алюмінієвих сплавів до асиметрії циклу навантаження, особливо при невеликих значеннях статичної компоненти циклу. У цьому випадку діаграми граничних напружень мають випуклу форму (сплави 2014-T6, 52S-36, 6061-T6, 24S-T, 61S, BS1476). В деяких випадках діаграми граничних амплітуд напружень алюмінієвих сплавів близькі до s-образної форми або лінійної (сплави BS1477, Д16Т, АК4-1, АК-4, АМг-6, 14S-T6).

В цілому вибір моделі для оцінки і прогнозування граничного стану алюмінієвих сплавів, може бути зроблений за допомогою одичного базового експерименту при від нульовому циклі навантажень для визначення коефіцієнтів λ і ξ . Результати розрахунків свідчать про те, що при значеннях коефіцієнтів $\lambda < 1$ і $\xi > 1$ можуть бути

застосовані моделі, побудовані на основі рівняння (7), а у випадку, коли коефіцієнти $\lambda > 2$ і $\xi < 0,5$ – моделі, побудовані на основі рівняння (4).

У підсумку задача розрахунку міцності при циклічному навантаженні за асиметрією зводиться до визначення структури еквівалентного напруження, яке відповідає амплітуді симетричного циклу навантажень за умови однієї і тієї ж довговічності за числом циклів до руйнування. Таким чином діаграма граничних амплітуд напружень за допомогою моделей граничного стану при асиметричному циклічному навантаженні дозволяє значно скоротити число експериментальних досліджень. Такі моделі потребують апробації в плані їх застосування для різних класів конструкційних матеріалів.

Висновки: Аналіз діючих стандартів на методи випробувань на втому зразків конструкційних матеріалів, а також останні дослідження втомі за умов асиметричного циклічного навантаження дозволяють зробити висновок про те, що методика випробувань на втому зразків матеріалів доцільно викласти в окремому стандарті.

Аналіз експериментальних даних, що відносяться до випробувань на втому за умов асиметрії навантажень свідчить про те, що лінійна, квадратична, гіперболічна, та інші залежності між амплітудою асиметричного циклу навантажень і його статичною складовою може бути використана для опису і побудови діаграм граничних амплітуд напружень для досить обмеженої кількості конструкційних матеріалів. Залежності, що містять параметри, які розраховані за результатами базових дослідів на втому можна назвати моделями граничного стану при асиметричному навантаженні, а отримані параметри називають константами матеріалу. У моделях граничного стану вони виконують роль коефіцієнтів, показників степені. Обсяг базового експерименту для отримання величин означених параметрів має бути невеликим у порівнянні з обсягом експерименту, потрібного для емпіричної побудови діаграми граничних амплітуд напружень.

Дослідження втомі матеріалів виконаних останніми роками показали, що адекватного опису, а головне, розрахунку діаграм граничних амплітуд напружень можна досягти використовуючи моделі граничного стану при асиметричному навантаженні побудовані на основі функцій косинусу, арккосинусу і степеневої функції. Для використання цих моделей необхідно визначити по одному параметру, які є показниками степені у структурі відповідних математичних співвідношень. Ці параметри можна трактувати як константи матеріалу.

На основі виконаних досліджень доцільно розробити стандарт, який значно скорочує обсяг експериментальних досліджень втомі металевих матеріалів.

Список літератури

1. ДСТУ 1.1 – 2001. Стандартизація та суміжні види діяльності. Терміни та визначення основних понять.
2. ДСТУ 1.2; 2003, Національна стандартизація. Правила розроблення нормативних документів.
3. ДСТУ 1.5; 2003, Національна стандартизація. Правила побудови, викладення оформлення та вимоги до змісту нормативних документів.
4. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник в 2-х част. – К: Наукова думка, 1987.

-
5. ДСТУ 2824-94. Розрахунки та випробування на міцність. Види і методи механічних випробувань. Терміни та визначення.
 6. ДСТУ 2825-94. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
 7. ДСТУ 2444-94 Розрахунки та випробування на міцність, Опір втомі. Терміни та визначення.
 8. Желдубовский А.В., Погребняк А.Д., Регульский М.Н. Расчет предельного состояния алюминиевых сплавов при асимметричном нагружении растяжения-сжатия // Проблемы прочности. – 2006, № 4. – С. 148-155.
 9. Голуб В.П., Крижановский В.И. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Пробл. прочности.- 1994.- № 4.- С. 3-15.

Стаття надійшла 23.05.2023.

Семак Інна Вікторівна – старший викладач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, вул. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна, E-mail: inna.semak@npp.nau.edu.ua., <https://orcid.org/0000-0001-9742-3226> тел.:+38 067 357 39 93.

Регульський Михайло Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, вул. Нестерова, 3, м. Київ, Україна, тел.: +38 097 892 63 88.

Борозенець Григорій Михайлович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, E-mail: borozenecg@gmail.com, тел.: +38 068 198 59 05.

I. V. SEMAK, M. M. REHULSKYI, H. M. BOROZENETS.

THE FATIGUE STRENGTH INVESTIGATION OF STRUCTURAL MATERIALS UNDER THE ASYMMETRIC CYCLIC LOADING CONDITIONS

There were analyzed the standard methods of testing the fatigue strength of structural materials samples under asymmetric cyclic loading conditions. It's shown that fatigue tests of structural materials are time-consuming and long-term. The results of the research can be used to develop a standard for fatigue testing methods of structural materials samples under asymmetric cyclic loading conditions, which will significantly reduce the amount of experiments required to determine the fatigue resistance characteristics under asymmetric cyclic loading.

Keywords: structural materials; analysis of standard methods; boundary stress diagrams; fatigue strength curves; reducing of the experimental research volume.

References

1. DSTU 1.1 – 2001. Standartyzatsiia ta sumizhni vydy diialnosti. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat.
2. DSTU 1.2; 2003, Natsionalna standartyzatsiia. Pravyla rozroblennia normatyvnykh dokumentiv.
3. DSTU 1.5; 2003, Natsionalna standartyzatsiia. Pravyla pobudovy, vykladennia oformlennia ta vymohy do zmistu normatyvnykh dokumentiv.
4. Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. Soprotivlenye ustalosty metallov y splavov: Spravochnyyk v 2-kh chast. – K: Naukova dumka, 1987.
5. DSTU 2824-94. Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist. Vydy i metody mekhanichnykh vyprobuvan. Terminy ta vyznachennia.
6. DSTU 2825-94. Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat.
7. DSTU 2444-94 Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist, Opir vtomi. Terminy ta vyznachennia.
8. Zheldubovskiy A.V., Pohrebniak A.D., Rehulskiy M.N. Raschet predelnogo sostoiannya aliumuneyvnykh splavov pry asymmetrychnom nahruzhenyy rastiazheniya-szhatyia // Problemy prochnosti. – 2006, № 4. – S. 148-155.
9. Holub V.P., Kryzhanovskiy V.Y. K otsenke predelnogo sostoiannya materyalov pry asymmetrychnom mnohotsyklovom nahruzhenyy // Probl. prochnosti.- 1994.- № 4.- S. 3-15.

Semak Inna Viktorivna – seniorteacher of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: inna.semak@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9742-3226> tel.:+38 067 357 39 93.

Rehulskiy Mykhailo Mykolaiovych – candidate of technical sciences, senior researcher at S.P.Timoshenko Institute of Mechanics of National Academy of Science of Ukraine, Nesterov str, 3, 03057 Kyiv, Ukraine, tel.: +38 097 892 63 88.

Borozenets Hryhorii Mykhailovych – candidate of technical sciences, senior researcher, E-mail: borozenec@gmail.com, tel.:+38 068 198 59 05.