

УДК 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2024-3-51-67

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ

А.В. Конопльов

д.т.н., професор, завідувач кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

ORCID ID: 0009-0009-9775-6018

e-mail: avkonnu@gmail.com

О.М. Кононова

к.т.н., доцент кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

ORCID ID: 0000-0001-6966-7223

e-mail: olgakononova120276@gmail.com

С.В. Бершак

к.т.н., доцент кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

ORCID ID: 0009-0004-0136-724X

e-mail: bershaksveta@ukr.net

Л.Л. Чинарова

доцент викладач кафедри «Математика, фізика та астрономія»

ORCID ID: 0000-0002-4684-7122

e-mail: tt_ari@ukr.net

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

В.В. Вовк

старший викладач кафедри «Машинознавство»

e-mail: vovk@op.edu.ua

Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна

Анотація. Розглянуто проблему, пов'язану з точністю експериментального визначення середньомовірного значення границі витривалості за допомогою двох методів, що ґрунтуються на комбінованому навантаженні. Цей вид навантаження передбачає поєднання або стаціонарного і нестаціонарного режимів, або двох нестаціонарних режимів при зростаючому і спадаючому навантаженні. Точність оцінки границі витривалості за допомогою методів цієї групи багато в чому залежить від розсіювання міцностних властивостей випробуваних об'єктів, тому розглянута проблема є актуальною.

Проведено аналіз точності двох методів, перший з яких заснований на випробуванні об'єктів при зростаючому та спадаючому навантаженні, а другий – на поєднанні стаціонарного та нестаціонарного навантажень. При цьому на конкретному прикладі показано, що першому методу властива систематична помилка, яка закладена в схему проведення експерименту.

© Конопльов А.В., Кононова О.М., Бершак С.В., Чинарова Л.Л., Вовк В.В., 2024

Ця помилка виникає у разі, коли менш міцний об'єкт випробовують при спадаючому навантаженні від початкових напружень, що відповідають руйнуванню міцнішого об'єкта.

Умовою проведення випробувань за другим методом є рівність руйнівного напруження першого об'єкта рівню напруження другого об'єкта, випробуваного при стаціонарному навантаженні. При цьому отримано співвідношення між сумарною довговічністю до руйнування першого об'єкта та довговічністю другого. Проведено аналіз цього співвідношення для двох основних рівнянь кривої втоми. Він показав, що коливання цього співвідношення залежить від вибору моделі кривої втоми, але при цьому незначно впливає на точність методу.

Ключові слова: випробування на опір втоми, комбіноване навантаження об'єктів, границя витривалості.

UDC 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2024-3-51-67

APPLICATION OF COMBINED LOADING TO DETERMINE THE FATIGUE LIMIT

A. Konoplev

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Mechanical Engineering and Engineering
ORCID ID: 0009-0009-9775-6018
e-mail: avkonmu@gmail.com

O. Kononova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical
Engineering and Engineering
ORCID ID: 0000-0001-6966-7223
e-mail: olgakononova120276@gmail.com

S. Bershak

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Mechanical Engineering and Engineering
ORCID ID: 0009-0004-0136-724X
e-mail: bershaksveta@ukr.net

L. Chinarova

Associate Professor of the Department of Mathematics, Physics and Astronomy
ORCID ID: 0000-0002-4684-7122
e-mail: tt_ari@ukr.net

Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine

V. Vovk

Senior Investigator of the Department of Mechanical Engineering
e-mail: vovk@op.edu.ua

National University «Odesa Polytechnics», Odesa, Ukraine

Abstract. *The article considers the problem related to the accuracy of experimental determination of the average probable value of the fatigue limit using two methods based on combined loading. This type of loading involves a combination of either stationary and non-stationary modes, or two non-stationary modes with increasing and decreasing loads. The accuracy of estimating the fatigue limit using the methods of this group largely depends on the dispersion of the strength properties of the test objects, so the problem under consideration is relevant.*

An analysis of the accuracy of two methods is carried out, the first of which is based on testing objects with increasing and decreasing loads, and the second – on a combination of stationary and non-stationary loads. At the same time, a specific example shows that the first method is characterized by a systematic error, which is embedded in the very scheme of the experiment. This error occurs when a less durable object is tested with a decreasing load from the initial stresses corresponding to the destruction of a stronger object. The condition for testing according to the second method is the equality of the destructive stress of the first object to the stress level of the second object tested under a steady load. In this case, a ratio was obtained between the total durability before the destruction of the first object and the durability of the second. An analysis of this ratio was carried out for two main equations of the fatigue curve. It showed that the fluctuation of this ratio depends on the choice of the fatigue curve model, but at the same time it slightly affects the accuracy of the method.

Keywords: *fatigue resistance tests, combined loading of objects, fatigue limit.*

Вступ. Однією з основних задач під час проведення випробувань деталей машин, конструкцій, а також їх моделей чи зразків на опір втомі є завдання, що пов'язане з визначенням границі витривалості. З точки зору планування експерименту її можна вирішити традиційно, шляхом проведення тривалих випробувань, або прискорено, використовуючи якийсь метод, що базується на скороченому експерименті. Завдяки вдосконаленню прискорених методів та підвищенню точності останніми роками їх стали частіше застосовувати в оцінці характеристик опору втомі деталей та елементів конструкцій.

Ці методи, крім обов'язкової експериментальної частини, включають і теоретичну, засновану на тих чи інших передумовах, гіпотезах, припущеннях і таке інше. Слід зазначити, що одній схемі проведення випробувань може відповідати безліч способів обробки їх результатів. Ця обставина розширює можливості прискорених методів, оскільки дозволяє зіставляти отримані результати між собою, і цим контролювати їх точність.

Мета статті є аналіз двозразкових прискорених методів визначення границі витривалості, що ґрунтуються на комбінованому навантаженні.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо варіанти проведення випробувань при комбінованому навантаженні об'єктів. Поєднання режимів навантаження може бути таким:

1. Перший об'єкт випробовують при зростаючому навантаженні, а другий – при стаціонарному режимі навантаження (в окремому випадку другий об'єкт випробовують при напруженнях, що відповідають руйнуванню першого об'єкта);

2. Перший об'єкт випробовують при безперервно зростаючому навантаженні, а другий – при безперервно спадаючому. При цьому початкове напруження приймають рівним руйнівному напруженню першого об'єкта (в окремому випадку для гарантованого руйнування другий об'єкт випробовують спочатку при спадаючому навантаженні, а потім – при зростаючому навантаженні).

У методах, заснованих на випробуваннях двох об'єктів, необхідно враховувати природне розсіювання їх характеристик міцності. Тож для отримання стійкої оцінки характеристик опору втомі, зазвичай випробовують дві партії об'єктів, обсяг яких встановлюють залежно від необхідної точності.

Серед двозразкових методів, метод заснований на випробуваннях двох об'єктів із зростаючим та спадаючим навантаженням є єдиним, що дозволяє визначати границю витривалості σ_R тільки на основі дослідної інформації [1]. З цієї точки зору він унікальний і становить найбільший інтерес при аналізі методів цієї групи.

Згідно зі схемою випробувань за даним методом перший об'єкт випробовують від початкового напруження σ_{11} при лінійно зростаючому навантаженні зі швидкістю α і фіксують напруження, при якому сталася руйнація σ_{P1} , (рис. 1).

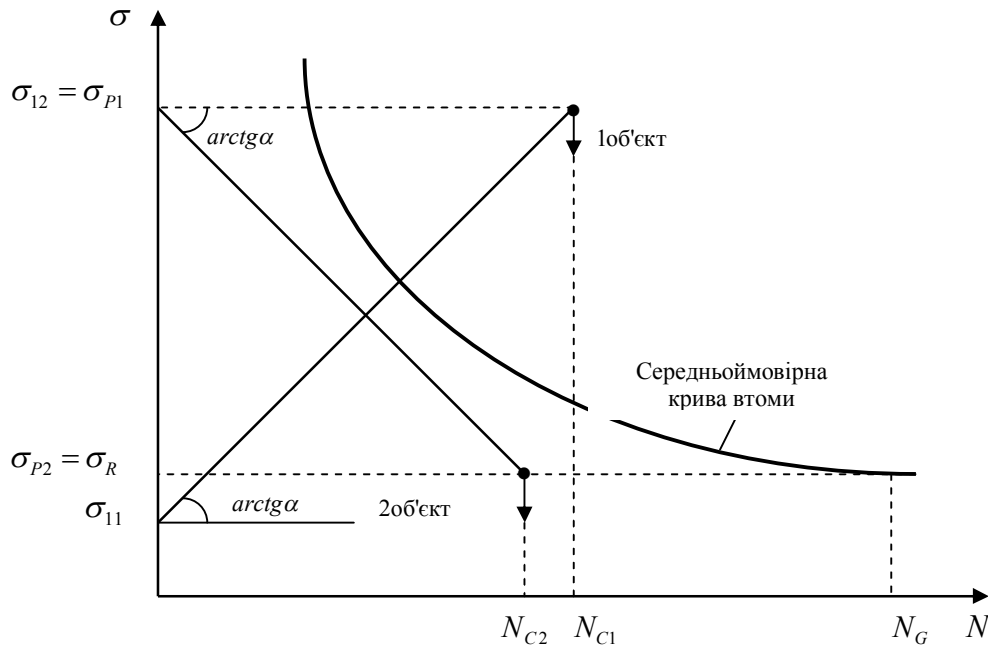


Рис. 1. Схема випробувань об'єктів при зростаючому та спадаючому навантаженні

Випробування другого об'єкта проводять при безперервно спадаючому навантаженні з тією ж швидкістю α від початкового рівня напруження σ_{12} , що дорівнює руйнівному напруженню першого об'єкта σ_{P1} .

Якщо знехтувати розсіюванням властивостей об'єктів і явищем тренування металу, то другий об'єкт, теоретично, відповідно до лінійної гіпотези накопичення втомних пошкоджень, зруйнується при напруженні, що дорівнює границі витривалості першого ($\sigma_{P2} = \sigma_R$). Реально, з урахуванням розсіювання властивостей міцності об'єктів, можливі тільки два варіанти: якщо границя витривалості першого об'єкта перевищує таку для другого ($\sigma_{R1} > \sigma_{R2}$), то другий об'єкт зруйнується при напруженні, що перевищує σ_{R1} ; якщо ж виявиться, що $\sigma_{R1} < \sigma_{R2}$ цей об'єкт не зруйнується. Щоб результат не був втрачений, проводять повторні випробування об'єкта, що не зруйнувався, причому при зростаючому навантаженні з тією ж швидкістю α , (рис. 2).

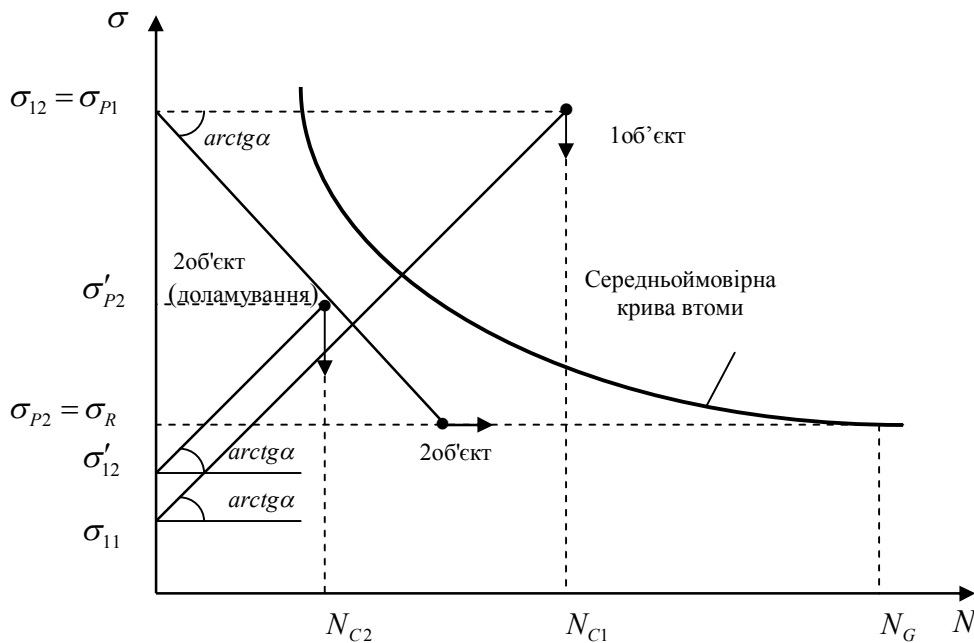


Рис. 2. Схема випробувань з доламуванням другого об'єкта

На схемах (рис. 1 і 2) прийняті такі позначення: N_{C1} , N_{C2} – сумарне число циклів до руйнування відповідно для першого і другого об'єктів; N_G – абсциса точки переходу похилої ділянки кривої втоми в горизонтальну.

Теоретична частина методу, що розглядається, заснована на використанні вищезгаданої гіпотези лінійного накопичення втомних пошкоджень і рівнянні Вейбулла, які стосовно наведеної схеми навантаження записуються у вигляді

$$\int_0^{N_c} dn / N = \left(\int_{\sigma_1}^{\sigma_R} d\sigma / N \right) / \alpha = a ; \quad (1)$$

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_w} = 10^{C_w} , \quad (2)$$

де dn – збільшення напруження; σ і N – поточні напруження та число циклів до руйнування; m_w та C_w – параметри; a – сума накопичених пошкоджень.

Вирішуючи спільно рівняння (1) та (2) отримаємо умови руйнування першого та другого об'єктів у вигляді [2]

$$(\sigma_{P1} - \sigma_R)^{m_w + 1} = \alpha(m_w + 1) \cdot 10^{C_w} ; \quad (3)$$

$$(\sigma_{P1} - \sigma_R)^{m_w + 1} + (\sigma'_{P2} - \sigma_R)^{m_w + 1} = \alpha(m_w + 1) \cdot 10^{C_w} . \quad (4)$$

Тепер, вирішуючи спільно рівняння (3) та (4), отримаємо

$$(\sigma'_{P2} - \sigma_R)^{m_w + 1} = 0 . \quad (5)$$

Звідки $\sigma_R = \sigma'_{P2}$.

Даному методу притаманні два основні недоліки. По-перше, суми накопичених втомних пошкоджень при зростаючому і спадаючому навантаженнях можуть істотно відрізнятись [3], і, по-друге, границя витривалості визначається з систематичною помилкою, закладеною в самій схемі випробувань. Дійсно, випробувавши менш міцний об'єкт при спадаючому навантаженні від початкових напружень, при яких зруйнувався міцніший об'єкт, отримаємо результат, що перевищує границю витривалості міцнішого об'єкта, що суперечить реальності. Для підтвердження цього логічного висновку розглянемо приклад, що ґрунтується на віртуальному експерименті. Нехай границі витривалості двох об'єктів становлять 200 МПа та 190 МПа. Приймаючи в рівняннях (1) та (2) $m_w = 1,0$; $C_w = 7,0$ (уніфікована крива втоми) та $\alpha = 100$ Па/цикл, отримаємо

$$\begin{aligned} \sigma_{12} &= \sigma_{R2} + \sqrt{(\sigma_{P1} - \sigma_{R2})^2 - \alpha(m_w + 1)10^{C_w}} = \\ &190 + \sqrt{(244,7 - 190)^2 - 100 \cdot 10^{-6}(1 + 1)10^7} = 221,5 \text{ МПа} \end{aligned}$$

де

$$\sigma_{P1} = \sigma_{R1} + \sqrt{10^{C_w} \cdot \alpha(m+1)} = 200 + \sqrt{10^7 \cdot (1+1)100 \cdot 10^{-6}} = 244,7 \text{ МПа} .$$

Отже, відносна помилка границі витривалості прийнятих вихідних даних становила 16,6 %, що підтверджує зроблений вище логічний висновок.

Розглянемо метод визначення границі витривалості, в основу якого покладено комбіноване (стаціонарне та безперервно зростаюче) навантаження об'єктів, що випробовуються [3]. У цьому методі реалізується схема, яка заснована на випробуваннях як мінімум двох об'єктів. Перший з них випробовують до руйнування при безперервно зростаючому навантаженні з постійною швидкістю його збільшення α і фіксують відповідне руйнівне напруження σ_{P1} . Випробування другого об'єкта проводять за стаціонарним навантаженням ($\alpha = 0$), приймаючи напруження $\sigma_{P1} = \sigma_{P2} = \sigma_{P12}$ (рис. 3).

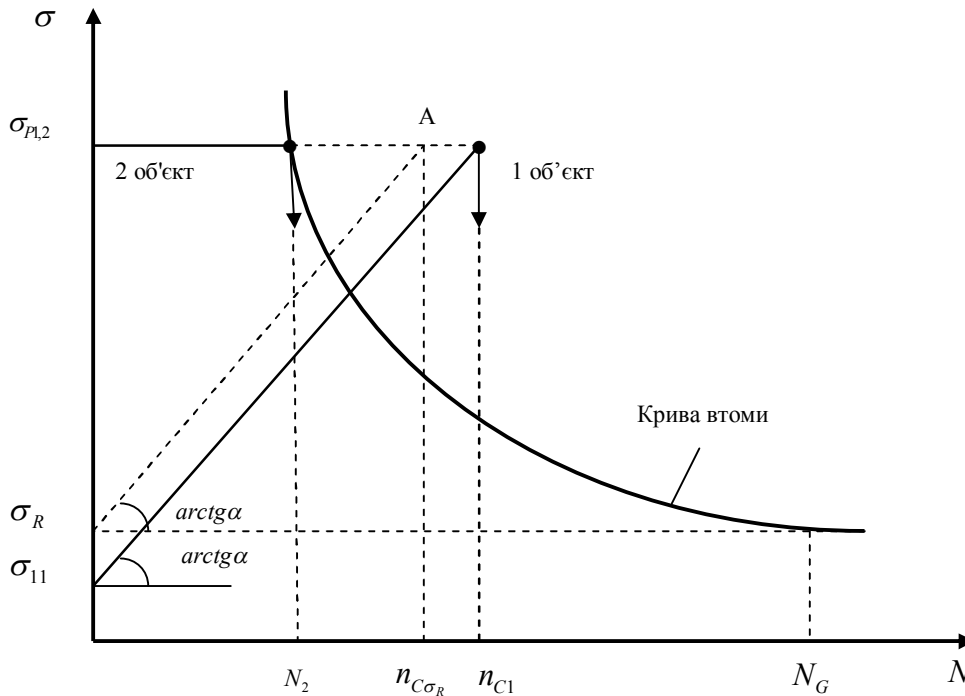


Рис. 3. Схема випробувань при комбінованому навантаженні об'єктів

Грунтуючись на рівнянні кривої втоми Вейбулла, виразимо довговічність N_2 , що відповідає напруженню σ_{P12} (див. рис. 3).

$$N_2 = \frac{10^{C_w}}{(\sigma_{P12} - \sigma_R)^{m_w}} . \quad (6)$$

Сумарна довговічність до руйнування $n_{C\sigma_R}$, що відповідає умові $\sigma_1 = \sigma_R$, згідно зі схемою навантаження, дорівнюватиме

$$n_{C\sigma_R} = \frac{\sigma_{P12} - \sigma_R}{\alpha}. \quad (7)$$

Виражаючи різницю $\sigma_{P12} - \sigma_R$ через параметри рівняння кривої втоми Вейбулла m_W і C_W , вважаючи, що при зростаючому навантаженні накопичення втомних пошкоджень підпорядковується лінійній гіпотезі накопичення пошкоджень, отримаємо

$$n_{C\sigma_R} = \frac{[\alpha \cdot (m_W + 1) \cdot 10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W + 1}}}{\alpha}. \quad (8)$$

Розділивши вираз (6) на (4), отримаємо

$$\frac{n_{C\sigma_R}}{N_2} = \frac{[\alpha \cdot (m_W + 1) \cdot 10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W + 1}} \cdot (\sigma_{P12} - \sigma_R)^{m_W}}{\alpha \cdot 10^{C_W}}. \quad (9)$$

Провівши необхідні перетворення, перепишемо залежність (7) у вигляді

$$\frac{n_{C\sigma_R}}{N_2} = \frac{[\alpha \cdot (m_W + 1) \cdot 10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W + 1}} \cdot [\alpha \cdot (m_W + 1) \cdot 10^{C_W}]^{\frac{m_W}{m_W + 1}}}{\alpha \cdot 10^{C_W}} = m_W + 1. \quad (10)$$

Таким чином, незалежно від швидкості збільшення навантаження α та початкової абсциси кривої втоми Вейбулла C_W відношення $n_{C\sigma_R}/N_2$ залежить лише від параметра m_W . У свою чергу, його величина залежить, в основному, від матеріалу і для сталевих об'єктів знаходиться в діапазоні значень 0,81-1,35 (в середньому $m_W = 1,08$) [3]. Приймаючи середнє значення $m_W = 1$, вираз (10) напишемо як

$$n_{C\sigma_R}/N_2 = 2. \quad (11)$$

Ця залежність, отримана на підставі кривої втоми Вейбулла, у разі використання інших моделей кривої втоми призведе до іншого результату.

Щоб оцінити вплив вибору моделі кривої втоми на відношення $n_{C\sigma_R}/N_2$, розрахуємо його для степеневі моделі кривої втоми. І тут залежність (8) запишеться як

$$\frac{n_{C\sigma_R}}{N_P} = \frac{(\sigma_P - \sigma_R) \cdot (m_C + 1) \cdot \sigma_P^{m_C}}{\sigma_P^{m_C + 1} - \sigma_R^{m_C + 1}}. \quad (12)$$

де $n_{C\sigma_R} = (\sigma_P - \sigma_R)/\alpha$, $\alpha = \frac{\sigma_P^{m_C + 1} - \sigma_R^{m_C + 1}}{(m_C + 1)10^{C_C}}$, $N_P = \frac{10^{C_C}}{\sigma_R^{m_C}}$.

З формули (12) випливає, що відношення $n_{C\sigma_R}/N_2$ залежить від границі витривалості та швидкості збільшення навантаження (опосередковано, через σ_P), тому визначимо це відношення для реального діапазону значень σ_R (50 – 500 МПа). Швидкість збільшення навантаження також впливатиме на величину цього відношення, тому задаємося значеннями α в реальних межах її зміни, тобто, 50-200 Па/цикл (табл. 1; рис. 4) Попередньо розрахуємо руйнівне напруження за формулою

$$\sigma_P = \left[\sigma_R^{m_c+1} + \alpha (m_c + 1) 10^{C_c} \right]^{1/m_c+1}. \quad (13)$$

Таблиця 1

Розрахункові значення відносини $n_{C\sigma_R}/N_2$ відповідно до залежності (12)

α , Па/цикл	σ_P , МПа	$n_{C\sigma_R}/N_2$	α , Па/цикл	σ_P , МПа	$n_{C\sigma_R}/N_2$
$\sigma_R = 50$ МПа			$\sigma_R = 100$ МПа		
50	65,7	1,4	50	127,0	1,5
100	75,0	1,7	100	141,0	1,8
200	87,5	1,8	200	158,6	2,1
$\sigma_R = 200$ МПа			$\sigma_R = 300$ МПа		
50	241,9	1,7	50	352,1	1,9
100	260,4	2,1	100	372,6	2,3
200	282,2	2,4	200	396,1	2,7
$\sigma_R = 400$ МПа			$\sigma_R = 500$ МПа		
50	459,0	2,0	50	564,3	2,1
100	480,7	2,4	100	586,6	2,5
200	504,9	2,9	200	611,2	3,0
Середнє значення					2,1

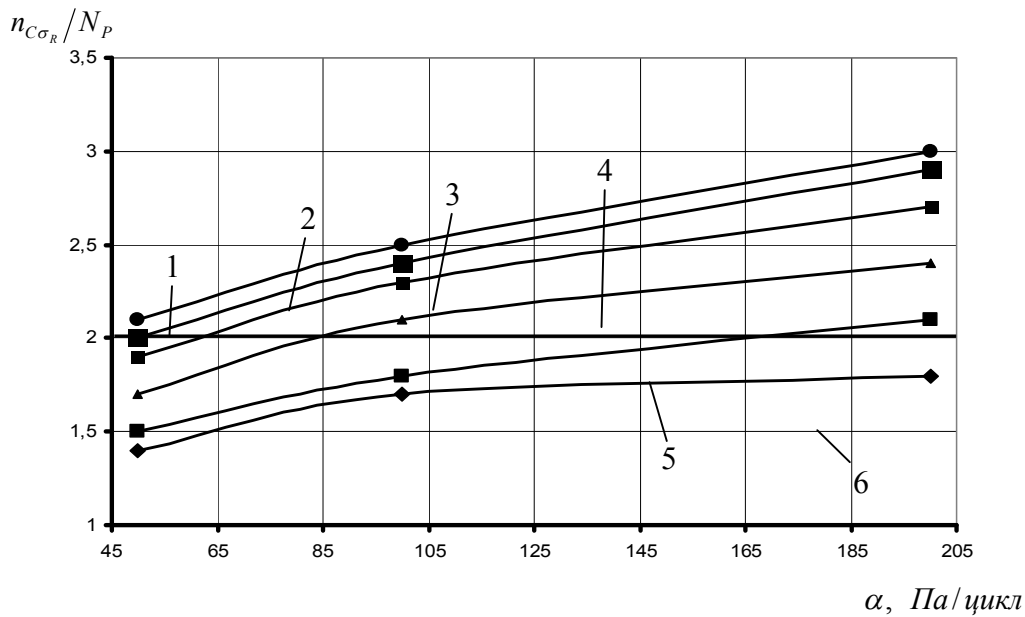


Рис. 4. Графік залежності $n_{C\sigma_R}/N_2$ від α значення σ_R (МПа):

1 – 50 МПа; 2 – 100 МПа; 3 – 200 МПа;
4 – 300 МПа; 5 – 400 МПа; 6 – 500 МПа.

Незважаючи на помітні відхилення відношення $n_{C\sigma_R}/N_2$ в залежності від швидкості збільшення амплітуди напружень, і значення границі витривалості, середня її величина виявилася практично рівною границі витривалості для рівняння Вейбулла.

Таким чином, у даному методі границя витривалості однозначно визначається графічно, шляхом проведення з точки *A* прямої лінії під кутом $\arctg\alpha$ до осі абсцис з урахуванням того, що $n_{C1} = 2N_2$ (рис. 3).

Ухвалення припущення про рівність одиниці параметра m_W призводить до систематичної похибки визначення границі витривалості, оцінити яку можна приблизно, скориставшись зв'язками параметрів m_W і C_W з границею витривалості [4].

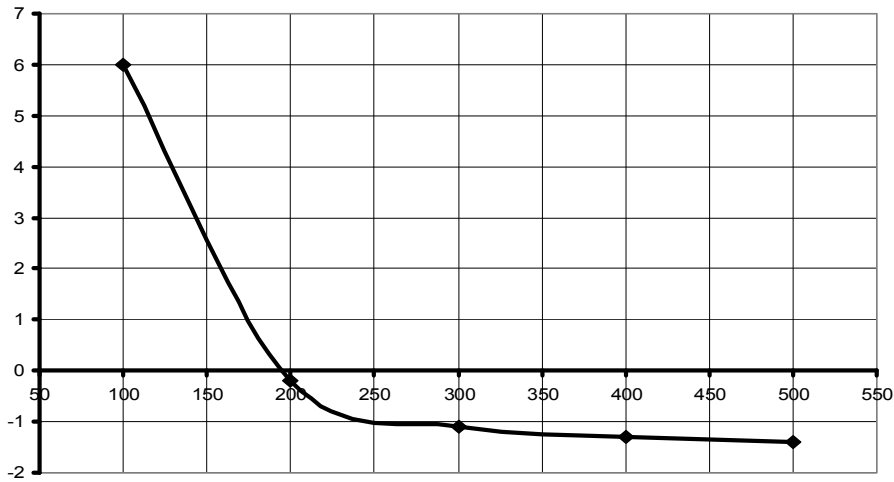
Результати розрахунку похибок границь витривалості, зумовлених опосередкуванням параметра m_W , для одної із швидкостей збільшення амплітуди напружень ($\alpha = 200$ Па/цикл) представлені в табл. 2 та на рис. 5.

Таблиця 2

Розрахункові значення похибок меж витривалості, зумовлених
опосередкуванням параметра m_W

σ_{P1} , МПа	N_P , цикл	α , Па/цикл	σ_R , МПа	δ_{σ_R} , %
$\sigma_R = 100 \text{ МПа} ; m_W = 1,16 ; C_W = 7,50$				
182,1	190266	200	106,0	6,0
$\sigma_R = 200 \text{ МПа} ; m_W = 0,99 ; C_W = 7,07$				
269,8	175624	200	199,7	-0,2
$\sigma_R = 300 \text{ МПа} ; m_W = 0,91 ; C_W = 6,88$				
365,0	169922	200	296,8	-1,1
$\sigma_R = 400 \text{ МПа} ; m_W = 0,85 ; C_W = 6,78$				
464,5	174532	200	394,8	-1,3
$\sigma_R = 500 \text{ МПа} ; m_W = 0,81 ; C_W = 6,71$				
564,0	176601	200	493,2	-1,4
Середнє значення				0,4

δ_{σ_R} , %



σ_R , МПа

Рис. 5. Графік залежності δ_{σ_R} від σ_R при $m_W = 1$

Абсолютне відхилення границі витривалості в розглянутому діапазоні її значень не перевищує 7 МПа, причому мінімальне відхилення відповідає границі витривалості, що дорівнює 200 МПа. Це пояснюється тим, що при цьому значенні σ_R параметр $m_w \approx 1$.

Похибка δ_{σ_R} , в даному випадку є відносною характеристикою точності методу, і її слід розглядати з прив'язкою до границі витривалості.

Крім похибок, зумовлених опосередкуванням параметра m_w , до факторів, що впливають на точність оцінки границі витривалості, слід віднести розсіювання величин N_2 і n_{C1} як це зображено на схемі (рис. 6).

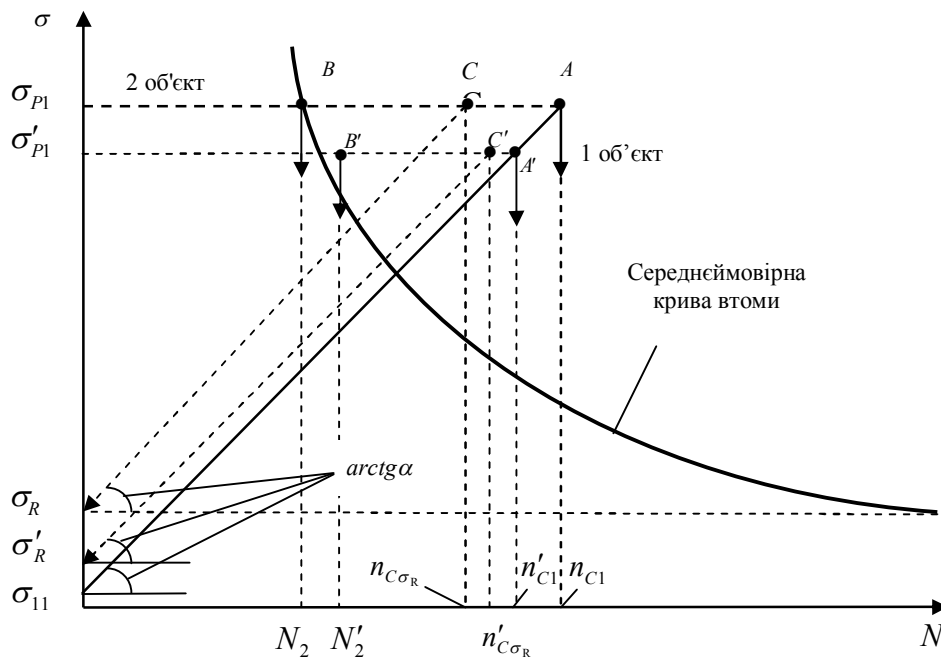


Рис. 6 Схема визначення похибки границі витривалості

На цій схемі представлений випадок, коли в результаті впливу цих факторів точка A перемістилася в точку A' , точка B – в точку B' , а точка C – в точку C' . В результаті цього границя витривалості набуде значення σ'_R .

Для оцінки похибки границі витривалості, обумовленої розсіюванням, визначимо за допомогою рівняння Вейбулла та залежностей (3.9) – (3.10) значення σ'_R та їх похибки δ_{σ_R} . Прийемо діапазон зміни значень границі витривалості σ'_R 100-500 МПа. Швидкість збільшення амплітуди напружень прийемо рівною $\alpha =$

200 МПа. Допустимі помилки визначення величин σ'_{P1} і $N'_2 \pm 2\%$; $\pm 2\%$ та $\pm 5\%$. (табл. 3).

Таблиця 3

Розрахункові значення σ'_{P1} та N'_2 при відхиленнях $\Delta_{\sigma_{P1}}$ та $\Delta_{n_{C2}}$,
що дорівнюють $\pm 2\%$; $\pm 3\%$ та $\pm 5\%$

σ'_{P1}			N'_2		
$\Delta_{\sigma_{P1}} = -2\%$	$\Delta_{\sigma_{P1}} = -3\%$	$\Delta_{\sigma_{P1}} = -5\%$	$\Delta_{n_{C2}} = +2\%$	$\Delta_{n_{C2}} = +3\%$	$\Delta_{n_{C2}} = +5\%$
178,5	176,6	173,0	195305	197219	201049
264,4	261,7	256,3	177998	179743	183233
357,7	354,1	346,8	174784	176498	179925
455,2	450,6	441,3	177699	179441	182926
552,7	547,1	535,8	180860	182633	186180

Границі витривалості σ'_R визначимо з рівняння Вейбулла, а також порахуємо помилки їх оцінки δ_{σ_R} (табл. 4)

Таблиця 4

Розрахункові значення $n'_{C\sigma_R}$ та σ'_R при відхиленнях $\Delta_{\sigma_{P1}}$ та $\Delta_{n_{C2}}$,
що дорівнюють $\pm 2\%$; $\pm 3\%$ та $\pm 5\%$

$n'_{C\sigma_R}$, Цикл.			σ'_R , МПа/ δ_{σ_R} , %		
$\Delta_{n_{C2}} = 2\%$	$\Delta_{n_{C2}} = 3\%$	$\Delta_{n_{C2}} = 5\%$	$\Delta_{\sigma_{P1}} = -2\%$ $\Delta_{n_{C2}} = +2\%$	$\Delta_{\sigma_{P1}} = -3\%$ $\Delta_{n_{C2}} = +3\%$	$\Delta_{\sigma_{P1}} = -5\%$ $\Delta_{n_{C2}} = +5\%$
$\bar{\sigma}_R = 100\text{МПа}; m_W = 1,16; C_W = 7,50; \alpha = 200$ Па/цикл					
421859	425993	434266	94,1/-5,9	91,4/-8,6	86,1/-13,9
$\bar{\sigma}_R = 200\text{МПа}; m_W = 0,99; C_W = 7,07; \alpha = 200$ Па/цикл					
354216	357689	364634	193,6/-3,2	190,2/-4,9	183,4/-8,3
$\bar{\sigma}_R = 300\text{МПа}; m_W = 0,91; C_W = 6,88; \alpha = 200$ Па/цикл					
333837	337111	343657	290,9/-3,0	286,7/-4,4	278,1/-7,3
$\bar{\sigma}_R = 400\text{МПа}; m_W = 0,85; C_W = 6,78; \alpha = 200$ Па/цикл					
328743	331966	338414	389,5/-2,6	384,2/-4,0	373,6/-6,6
$\bar{\sigma}_R = 500\text{МПа}; m_W = 0,81; C_W = 6,71; \alpha = 200$ Па/цикл					
327357	330566	336986	487,2/-2,6	481,0/-3,8	468,4/-6,3

Для отримання загальної картини похибки методу при різних границях витривалості, підсумуємо абсолютні величини похибок, зумовлених опосередку-

ванням параметра m_w з похибками, пов'язаними з розсіюванням величин N_p (n_c табл. 5, рис. 7).

Для визначення необхідної кількості об'єктів, що забезпечують необхідну точність методу, поставимо коефіцієнтами варіації величин n_c і N_p , орієнтуючись на випробування аналогічних об'єктів.

Крім того, поставимо також статистичну надійність $P=1-\alpha/2$. Прийнемо коефіцієнти варіації величин σ'_{p1} і N_{p2} рівними 0,04 та статистичну надійність $P=1-\alpha/2=1-0,5/2=0,95$.

Таблиця 5

Розрахункові значення сумарних похибок границь витривалості

$\sigma_R, \text{МПа}$	$\sigma_R, \text{МПа} / \delta_{\sigma_R}, \%$		
	$\Delta_{\sigma_{p1}} = -2\%$ $\Delta_{n_{c2}} = 2\%$	$\Delta_{\sigma_{p1}} = -3\%$ $\Delta_{n_{c2}} = 3\%$	$\Delta_{\sigma_{p1}} = -5\%$ $\Delta_{n_{c2}} = 5\%$
100	11,9	14,6	19,9
200	9,2	10,9	14,3
300	9,0	10,4	13,3
400	8,6	10,0	12,6
500	8,6	9,8	12,3

У цьому випадку кількість об'єктів може бути визначена за допомогою залежності

$$n = \frac{\gamma_N^2}{\Delta_N^2} z_{1-\alpha/2}^2 \quad (12)$$

Таким чином, при $\Delta_{n_{c1}} = \pm 2\%$ і $\Delta_{\sigma_{p2}} = \pm 2\%$ їх кількість складе 22 штуки, при $\Delta_{n_{c1}} = \pm 3\%$ і $\Delta_{\sigma_{p2}} = \pm 3\%$ – 10 штук і при $\Delta_{n_{c1}} = \pm 5\%$ і $\Delta_{\sigma_{p2}} = \pm 5\%$ – 4 штуки. З урахуванням цієї інформації та даних табл. 5. побудуємо залежності $\delta_{\sigma_R}(n)$ для значень границь витривалості 100 – 500 МПа (рис. 7)

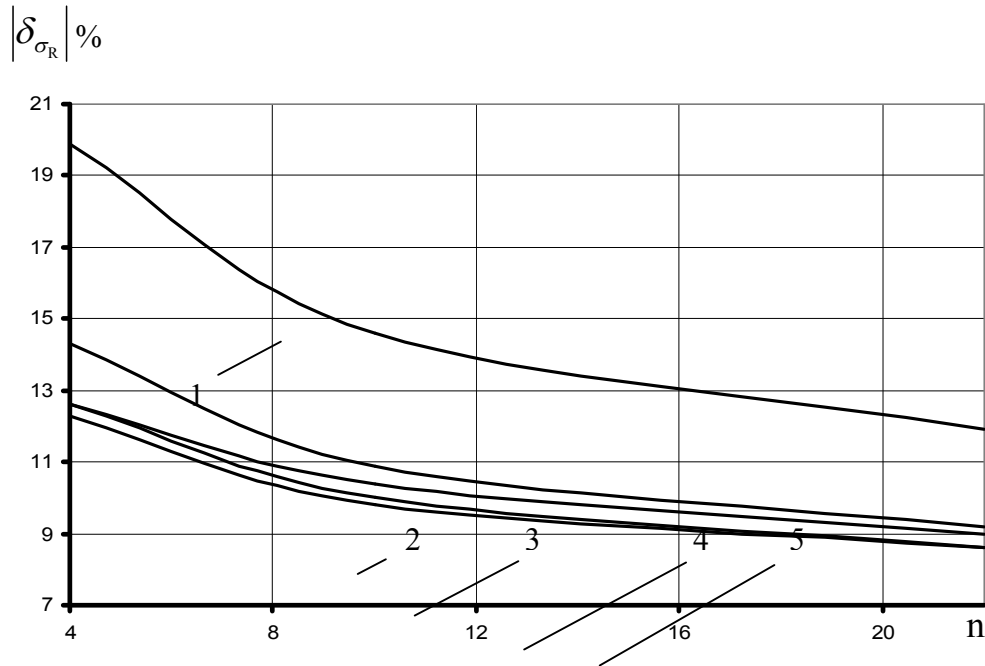


Рис. 7. Залежність $\delta_{\sigma_R}(n)$ 1 - $\sigma_R = 100$ МПа; 2 - $\sigma_R = 200$ МПа;
3 - $\sigma_R = 300$ МПа; 4 - $\sigma_R = 400$ МПа; 5 - $\sigma_R = 500$ МПа.

Емпірична апробація методу була здійснена на стандартних гладких та надрізаних зразках, виготовлених зі Сталі 45 та Сталі 40Х. Зразки випробували на установці НУ-3000, обладнаній пристроєм для нестационарного навантаження. Навантаження на зразок, що обертається, змінювалося за симетричним циклом. Результати випробувань, характеристики зразків, їх кількість та розрахунки величин σ_R та δ_{σ_R} представлені в табл. 6.

Таблиця 6

Результати розрахунку границь витривалості та їх похибок для гладких та надрізаних зразків із сталі 45 та сталі 40Х

σ_f , МПа	$\bar{\sigma}_f$, МПа	α , Па/цикл	\bar{N} , Цикл.	σ_R , МПа	δ_{σ_R} , %
1	2	3	4	5	6
Зразки гладкі; Сталь 45; $\bar{\sigma}_R = 250$ МПа; $\alpha_f = 1,029$; $\bar{\sigma}_f = 299,2$ МПа; загальна кількість випробуваних об'єктів – 10					

Продовження табл. 6

1	2	3	4	5	6
240	299,2	100	113840	276,5	10,6
Зразки з надрізом; сталь 45; $\bar{\sigma}_R = 204$ МПа; $\alpha_g = 1,556$; $\bar{\sigma}_p = 248,6$ МПа; загальна кількість випробуваних об'єктів – 10					
180	248,6	50	274800	221,3	8,5
Зразки з надрізом; сталь 45; $\bar{\sigma}_R = 145$ МПа; $\alpha_g = 2,625$; $\bar{\sigma}_p = 226,8$ МПа; загальна кількість випробуваних об'єктів – 10					
120	226,8	200	213850	141,3	-2,3
Зразки з надрізом; сталь 40X; $\bar{\sigma}_R = 154$ МПа; $\alpha_g = 1,772$; $\bar{\sigma}_p = 198,6$ МПа; загальна кількість випробуваних об'єктів – 9					
160	198,6	50	521850	146,4	-4,9

Висновки

1. Суперечність, закладена в методі, заснованому на випробуваннях зі зростаючим і спадаючим навантаженням, може призводити, як показали розрахунки, до похибок, що перевищують допустимі.

2. Похибки визначення границі витривалості, знайдені методом з комбінованим навантаженням, не перевищили значень, обмежених графіком (див. рис. 7). Таким чином, підтверджено достовірність отриманих розрахунковим шляхом залежностей сумарної похибки методу кількості випробуваних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олійник М.В., Конопльов А.В. Визначення границі витривалості деталей машин методом зростаючого та спадаючого навантаження. Деталі машин: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. 1992. Вип. 53. С. 99-103.
2. Collins J.A. Failure of materials in mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention: Willey, 1981, 629 p.
3. Олійник М.В., Конопльов А.В., Кібаков О.Г. Методи прискореного визначення характеристик опору втомі у практичних додатках. Одеса: Астропринт, 2000. 138 с.
4. Конопльов А.В., Селюкова Є.В. Визначення границі витривалості деталей машин методом Про з урахуванням взаємозв'язку між його параметрами. Деталі машин: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. 1988. Вип. 40. С. 102-104.

REFERENCES

1. Oliinyk M.V., Konoplov A.V. Vyznachennia hranytsi vytryvalosti detalei mashyn metodom zrostaiuchoho ta spadaiuchoho navantazhennia. Detali mashyn: Resp. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. 1992. Vyp. 53. P. 99-103.
2. Collins J.A. Failure of materials in mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention: Willey, 1981, 629 p.
3. Oliinyk M.V., Konoplov A.V., Kibakov O.H. Metody pryskorenoho vyznachen-nia kharakterystyk oporu vtomi u praktychnykh dodatkakh. Odesa: Astroprynt, 2000. 138 p.
4. Konoplov A.V., Seliukova Ye.V. Vyznachennia hranytsi vytryvalosti detalei mashyn metodom Pro z urakhuvanniam vzaiemozviazku mizh yoho parametramy. Detali mashyn: Resp. mizhvid. nauk.-tekhn. zb.1988.Vyp. 40. P.102-104.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2024

Посилання на статтю: Конопльов А.В., Кононова О.М., Бершак С.В., Чинарова Л.Л., Вовк В.В. Застосування комбінованого навантаження для визначення границі витривалості // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2024. № 3 (74). С. 51-67. DOI 10.47049/2226-1893-2024-3-51-67.

Article received 20.05.2024

Reference a journal artic: Konoplev A., Kononova O., Bershak S., Chinarova L., Vovk V. Application of combined loading to determine the fatigue limit // *Herald of the Odesa national maritime university*: Coll. scient. works, 2024. № 3 (74). P. 51-67. DOI 10.47049/2226-1893-2024-3-51-67.