

МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАРОДЖЕННЯ ТРІЩИНИ В УМОВАХ ФРЕТИНГ-УТОМИ

Г.В. Цибаньов, Ю.П. Кураш

PROCEDURE AND RESULTS OF INVESTIGATION OF CRACK INITIATION UNDER FRETTING FATIGUE

G.V. Tsyban'ov, Yu.P. Kurash

*Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренко
Національної академії наук України, Україна*

Abstract Technique for determination of crack initiation lifetime under fretting fatigue has developed. It represents a combination of the French's method and the statistical staircase method. Using this technique, relation between crack initiation and total lifetime for pair of steel 15 kp – steel 45 under fretting fatigue established. Fatigue crack initiation part constitutes about 50 per cent when total lifetime is equal to $\sim 10^6$ cycles. Lowering stress amplitude down to fretting fatigue limit leads to increasing the fatigue crack initiation part.

Вступ. При дослідженні фретинг-утоми матеріалів частіше за все встановлюється зв'язок параметрів фретинга з довговічністю до повного руйнування зразків. В той же час головний ефект фретингу пов'язаний з дією на поверхневий шар матеріалу сил тертя та контакту у першому періоді циклічного навантаження, коли від цих сил зароджується поверхнева тріщина, так як на подальший її ріст ці сили впливають мало. Тому при встановленні критеріїв граничного стану матеріалу в зоні фретингу, їх слід пов'язувати з зародженням тріщини фретинг-утоми, а не з повною довговічністю.

У більшості випадків ці підходи пов'язані з необхідністю вимірювання розміру тріщини, в той час як сам розмір може вибиратися виходячи з технічних можливостей експериментатора. Можна вважати фізично обґрунтованим розміром дефекту, утвореного за рахунок циклічного навантаження і який може бути прийнятим за розмір тріщини, що зародилася, є такий, що приводить до подальшого росту цього дефекту як тріщини при циклічних напруженнях, які відповідають початковій границі витривалості досліджуваного матеріалу. Розмір такого дефекту важко визначити безпосередньо, але довговічність до його утворення може бути визначена за методом Френча [1]. В роботах [2,3] було запропоновано вважати лінію Френча такою, що відповідає кривій втоми за критерієм зародження тріщини. Така ж ідеологія була закладена у дослідженнях стадії зародження тріщини в умовах фретинг-утоми, коли доступ для оптичного визначення наявності та довжини тріщини утруднений. Довговічність до зародження тріщини фретинг-утоми визначалась напрацюванням, за якого у зразку розвивався дефект який знижує початкову границю витривалості, визначену в умовах „чистої” втоми [4,5].

Подібна методика визначення довговічності до зародження тріщини в умовах фретинг-утоми використана також в роботі [6]. Для цього застосовували метод "драбини", відомий в математичній статистиці як метод "догори-вниз". Такий же шлях вибрано і у цьому дослідженні і нижче описані методичні особливості цих досліджень та одержані результати.

Методика визначення довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми. Для реалізації методу приймаємо наступні припущення. Вважаємо, по-перше, що розподіл довговічностей до зародження тріщини фретинг-утоми досить точно можна апроксимувати логарифмічно-нормальним законом розподілу. По-друге, що кожний індивідуальний зразок має визначену довговічність до зародження тріщини фретинг-

утоми за даних умов навантаження таку, що тріщина фретинг-утоми буде виникати в зразку, якщо зразок зазнає дії фретинг-утоми впродовж кількості циклів більшої або рівної довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми, та не буде виникати якщо зразок зазнає дії фретингу впродовж кількості циклів меншої ніж довговічність до зародження тріщини фретинг-утоми. Таким чином, генеральна сукупність довговічностей усіх зразків, де виникла тріщина фретинг-утоми, характеризується за допомогою випадкової змінної – довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми. Але цю випадкову змінну неможливо визначити безпосередньо, так як результати експериментів тільки встановлюють для кожного зразка перевищує чи ні кількість циклів дії фретингу довговічність до зародження тріщини фретинг-утоми. Тому була розроблена методика визначення цієї випадкової змінної, яка приведена нижче.

Зразки досліджували при циклічному навантаженні на двох рівнях осевого напруження, що перевищує границю фретинг-витривалості, за постійних значень площі контакту та номінального контактного тиску. Перший зразок зазнає дії фретингу впродовж очікуваної кількості циклів до зародження тріщини N_{ifr} , попередню оцінку якої можна зробити виходячи з закону росту тріщини Париса для напів-еліптичної тріщини [7].

Після напрацювання кількості циклів n_{fr} пристрій для ініціювання фретингу демонтується і досліджується наявність тріщини методом циклічного долому. За цим методом зразок після напрацювання n_{fr} навантажували при "чистій" втомі на рівні границі витривалості σ_r , яка була визначена попередньо, до руйнування або напрацювання базової кількості циклів. Оскільки рівень циклічного навантаження при напрацюванні нижчий за межу початку розвитку тріщини в умовах "чистої" утоми, то вважаємо, що за зародження тріщини відповідають процеси фретингу. Якщо зразок зруйнувався при напруженні σ_r , то фретинг-утомне навантаження призвело до пошкодження матеріалу і зародження тріщини. Якщо зразок не зруйнувався, то попереднє фретинг-утомне навантаження не викликало пошкодження матеріалу, яке знижує початкову границю витривалості при "чистій" втомі.

Якщо наявність тріщини таким методом не виявлено (зразок не зруйнувався), то кількість циклів навантаження в умовах фретингу для наступного зразка збільшували, а якщо виявлено - то навпаки, зменшували. В загальному випадку наступний зразок напрацьовували в умовах дії фретингу впродовж кількості циклів, визначених залежністю:

$$(n_{fr})_j = (n_{fr})_{j-1} \pm d, \quad (1)$$

де d – інтервал між рівнями напрацювання в умовах фретингу; j – номер досліджу.

У формулі (1) знак "+" береться у випадку якщо у попередньому $j - 1$ зразку тріщина фретинг-утоми не виявлена, а знак "-" у випадку наявності тріщини фретинг-утоми. Вважається [8], що аналіз даних буде достатньо надійним, якщо інтервал між рівнями напрацювання в умовах фретингу буде дорівнювати стандартному відхиленню розподілу довговічностей до зародження тріщини в умовах фретинг-утоми. Оскільки ця величина на початку досліджень невідома, то згідно з [9] вважаємо, що до розсіювання довговічності до руйнування зразка призводить розсіювання довговічності до зародження тріщини. Отже, використовували стандартне відхилення розподілу довговічності до руйнування в умовах фретинг-утоми, яке визначено за результатами попередніх одностадійних досліджень. Згідно з Браунлі (Brownlee) [10] використовували по 5 – 10 зразків на кожному рівні осевого навантаження. При цьому знаходили мінімальне значення кількості циклів для зародження тріщини фретинг-утоми N_{ifr} , після напрацювання якого починається її розвиток.

Для статистичного аналізу результатів досліджень використовували метод максимальної правдоподібності [8]. При аналізі статистичних характеристик перевага надається менш частій події з відсутності або наявності тріщини. У відповідності до

цього методу оцінку параметрів середнього значення $M\{N_{ifr}\}$ та середньоквадратичного відхилення $D\{N_{ifr}\}$ визначали з рівнянь

$$\sum_{i=-\infty}^{+\infty} n_i \left[\frac{\varphi(z_{i-1})}{q_{i-1}} - \frac{\varphi(z_i)}{P_{i-1}} \right] = 0; \quad (3)$$

$$\sum_{i=-\infty}^{+\infty} n_i \left[\frac{(z_{i-1})\varphi(z_{i-1})}{q_{i-1}} - \frac{(z_i)\varphi(z_i)}{P_{i-1}} \right] = 0, \quad (4)$$

де n_i – кількість досліджених зразків, в яких виявлено наявність тріщини на j -тому рівні фретинг-напрацювання (вважаємо, що кількість зразків, де тріщина виявлена, менша кількості зразків де тріщина не виявлена); $\varphi(z_i)$ – деяка функція від z_i ;

$Z_i = \frac{(n_{fr})_i M\{N_{ifr}\}}{\sqrt{D\{N_{ifr}\}}}$ – нормована нормально розподілена величина; $(n_{fr})_i$ – рівень фретинг-напрацювання при дослідженнях; $P_i = 1 - q_i$ – вірогідність виявлення тріщини на i -тому рівні фретинг-напрацювання.

Безпосереднє вирішення цих рівнянь ускладнене, тому використовуємо лінійну апроксимацію цих рівнянь [8], яка справедлива при $d < 2\sqrt{D\{N_{ifr}\}}$ та дає можливість визначити характеристики розсіяння довговічностей N_{ifr} (середнє значення та середньоквадратичне відхилення) за формулами [11,12,13]:

$$M\{N_{ifr}\} = (n_{fr})_{\min} \pm d \left(\frac{A}{C} - \frac{1}{2} \right); \quad (5)$$

$$D\{N_{ifr}\} = 1.62 d \left(\frac{CB - A^2}{C^2} + 0.029 \right); \quad (6)$$

де $A = \sum_{i=0}^R i r_i$, $B = \sum_{i=0}^R i^2 r_i$, $C = \sum_{i=0}^R r_i$;

$(n_{fr})_{\min}$ – найменша кількість циклів напрацювання n_{fr} при якому відсутня або наявна тріщина фретинг-утоми;

r_i – кількість однакових подій на i -й сходинці;

R – кількість сходинок;

$i = 0, 1, 2, \dots, R$ – порядковий номер рівня.

В формулі (6) береться знак "+", якщо загальна кількість зразків де виявлена тріщина, більша за кількість зразків, де тріщина не виявлена, тобто аналізується відсутність тріщини, а знак "-" – якщо загальна кількість зразків, де виявлена тріщина менша за кількість зразків, де тріщина не виявлена, тобто аналізується наявність тріщини.

Використана апроксимація рівнянь (1, 2) справедлива, якщо виконується умова [11,12,13]:

$$(C \cdot B - A^2) / C > 0,3, \quad (7)$$

що відповідає вимозі $d < 2\sqrt{D\{N_{ifr}\}}$.

Для підрахунку середньоквадратичних похибок оцінки параметрів стандартного відхилення вибіркового середнього $S_{M\{N_{ifr}\}}$ та стандартного відхилення вибіркового значення $S_{N_{ifr}}$, що позначено S_S , застосовували формули [11,12,13].

$$S_{M\{N_{ifr}\}} = \frac{G \cdot D\{N_{ifr}\}}{\sqrt{C}}; \quad (8)$$

$$S_S = \frac{H \cdot D\{N_{ifr}\}}{\sqrt{C}}; \quad (9)$$

$$G = \frac{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \varpi_i}{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \varpi_i \left[\frac{\varphi^2(z_{i-1})}{q_{i-1}^2} + \frac{\varphi^2(z_i)}{P_{i-1}^2} \right]}; \quad (10)$$

$$H = \frac{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \varpi_i}{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \varpi_i \left[\frac{(z_{i-1})^2 \varphi^2(z_{i-1})}{q_{i-1}^2} + \frac{(z_i)^2 \varphi^2(z_i)}{P_{i-1}^2} \right]}; \quad (11)$$

де $\frac{\varpi_i}{\sum_{i=-\infty}^{+\infty} \varpi_i}$ - відносний об'єм випробувань на і-тому рівні напрацювання (для зразків в яких виявлено тріщину).

Залежності функцій G та H від співвідношення $\frac{d}{D\{N_{ifr}\}}$ та положення середнього значення напрацювання до зародження тріщини $M\{N_{ifr}\}$ відносно рівнів напрацювання можуть бути побудовані згідно з [11].

Оцінка розміру зародженої тріщини. У зв'язку з наявністю в літературних джерелах значної кількості пропозицій з визначення довговічності при фретинг-утомі на основі використання підходів механіки руйнування важливим подальшим кроком у дослідженнях є оцінка довговічності до моменту зародження тріщини, після якого вже можна використовувати методи механіки руйнування. Вище була викладена методика експериментального визначення довговічності до зародження тріщини (дефекту) фретинг-утоми такої величини, яка (який) може розвиватися в умовах „чистої” втоми (без наявності дії фретинга) при навантаженні на рівні границі витривалості. У відповідності з літературними даними [14] лінія втоми за зародженням тріщини побудована таким методом і яка відповідає лінії Френча [1], свідчить про коалесценцію субмікроскопічних тріщин і утворення мікротріщин, які не зникають при термообробці, і тому матеріал досягнув стадії незворотної пошкодженості [14]. Результати досліджень сталі з 0,11% вуглецю показують, що лінія Френча відповідає наявності поверхневої тріщини довжиною 0,1 мм [3,15]. Результати робіт [16, 17] свідчать, що для більш міцних сталей довжина тріщини дещо зменшується. Виходячи з того, що точка на кривій втоми (по кінцевому руйнування зразка) з координатами N_o, σ_r (N_o - абсциса точки зламу кривої втоми, σ_r - границя витривалості) також належить лінії Френча [14], приймемо до уваги, що для сталей 45 і 12ХН3А при циклічному розтязі – стиску були зафіксовані довжини поверхневої тріщини на границі витривалості на рівні 0,04...0,07 і 0,02...0,036 мкм відповідно [16,17].

Враховуючи розмір структурного елементу (зерна) сталей феритно-перлитного класу, до яких належать названі вище сталі, в тому числі сталь 15кп, яка досліджується,

можна сказати, що довжина поверхневої тріщини, яка відповідає лінії Френча і циклічне напруження до зародження якої можна вважати моментом зародження тріщини, становить близько 2...3 розмірів зерна, тобто, для нашого випадку – це поверхнева тріщини довжиною 0,05-0,1 мм.

Результати експериментальних досліджень. Дані були одержані для фретинг-пари сталь 15кп – сталь 45 при контактному напруженні $P_k = 90$ МПа.

На рисунках 1 і 2 наведені дані випробувань двостадійним методом „драбини” (за циклічних напружень 190 МПа (рис. 1) і 150 МПа (рис. 2)). Досліджено два рівні амплітуди напруження, на яких одержано значення циклічних напружень, що ведуть до зародження тріщини втоми і які дозволяють побудувати криву за критерієм зародження тріщини, що буде проаналізовано далі.

У відповідності з непрямою методикою визначення довговічності до зародження тріщини фретинг-втоми, викладеною вище, і експериментальними даними, одержаними за цією методикою, на рис. 3 приведені ці результати у вигляді кривих втоми по зародженню тріщини і по повному руйнуванню зразків. Для подальшого аналізу запишемо криві втоми у вигляді рівнянь лінійної регресії:

$$\lg N_{ifr} = 10,2308 - 0,02917 \sigma_a; \quad (12)$$

$$\lg N_{fr} = 9,6963 - 0,02373 \sigma_a, \quad (13)$$

де N_{ifr} - довговічність до зародження тріщини фретинг-утоми, визначена за прийнятою методикою; N_{fr} - довговічність до повного руйнування зразка при фретинг-утомі.

Виходячи з цих рівнянь регресії, виконані розрахунки відносної довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми для різних значень амплітуд напружень і повних довговічностей. Ці результати приведені в таблиці.

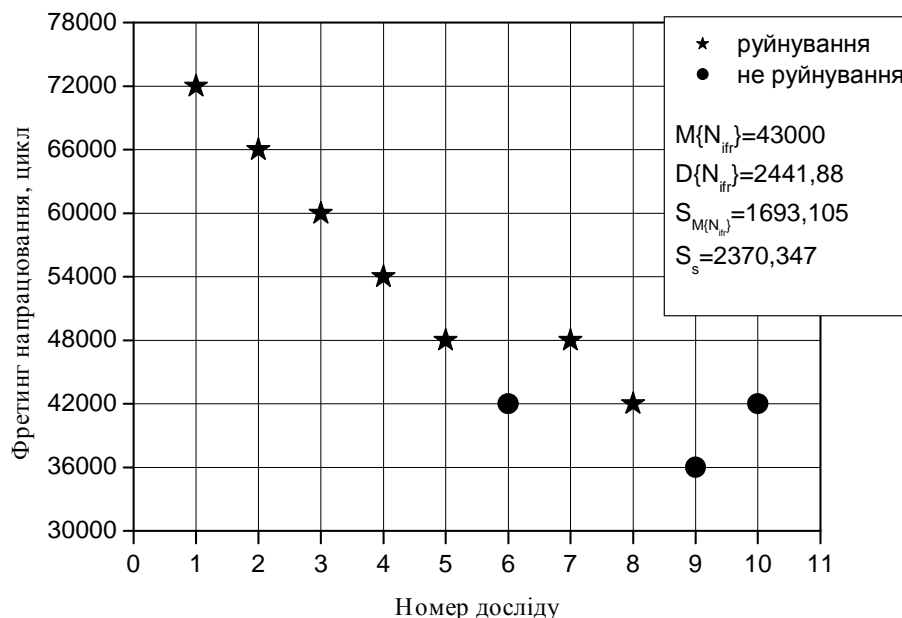


Рис. 1. Результати досліджень методом "драбини" пари сталь 15кп – сталь 45; контртіло розміром $A = 1$ мм; $\sigma_a = 190$ МПа; $P_k = 90$ МПа.

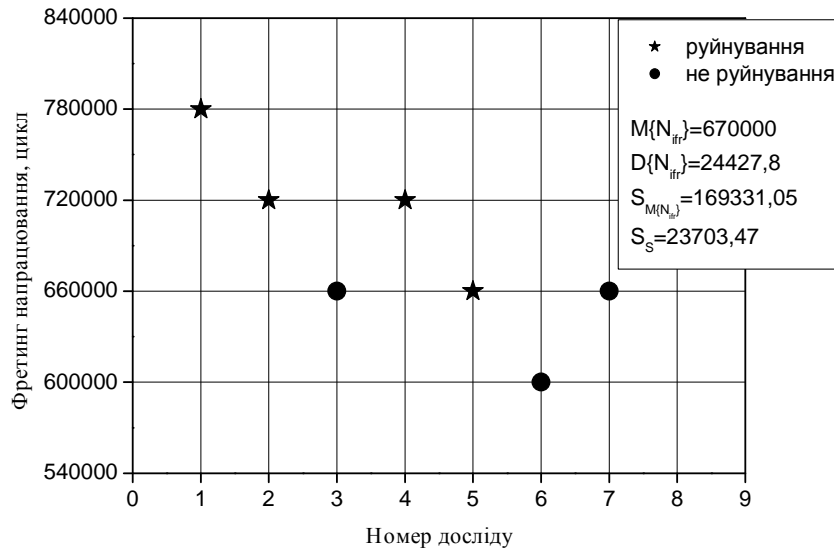


Рис. 2. Результати досліджень методом "драбини" пари сталь 15кп – сталь 45; контртіло розміром $A = 1$ мм; $\sigma_a = 150$ МПа; $P_k = 90$ МПа

Таблиця. Результати розрахунку відносної довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми в контактї сталь 15кп- сталь 45 при контактному напруженні 90 МПа

Амплітуда напружень, МПа	Довговічність, відносна довговічність				
	$N_{fr} \cdot 10^4$, цикл	$N_{ifr} \cdot 10^4$, цикл	$N_{ifr}/N_{fr} \cdot 100\%$	$N'_{fr} \cdot 10^4$, цикл	$N'_{ifr}/N_{fr} \cdot 100\%$
240,0	1	0,17	17,0	0,25	25
197,9	10	2,88	28,8	4,27	42,7
155,74	100	48,76	48,76	72,49	72,49
143,06	200	114,26	57,13	169,9	84,95
130,0	408,32	274,7	67,28	408,3	100

Надалі була виконана ще одна оцінка тривалості стадії зародження тріщини фретинг-утоми. Враховуючи прийнятну методику, перевірка тривалості стадії зародження тріщини проводили на рівні границі витривалості одержаної за „чистої” утоми, то при цьому знаходиться довговічність до зародження такої тріщини фретинг-утоми, яка не знижує границю витривалості гладкого зразка. Так як для гладкого зразка $\sigma_{-1} = 190$ МПа, а границя витривалості при фретинг-утомі становить $\sigma_{-1fr} = 130$ МПа, то для зниження σ_{-1fr} повинна зародитися тріщина більшої довжини, ніж це відбувається за визначеної експериментальної довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми N_{ifr} , коли долом зразка виконувався на рівні σ_r . Для оцінки довговічності до зародження такої тріщини прийнято до уваги той факт, що за числа циклів навантаження N_o , що відповідає абсцисі злому кривої фретинг-утоми на рівні границі витривалості при фретинг-утомі, у матеріалі зароджується тріщина фретинг-утоми. Для її подальшого розвитку необхідно незначно перевищити границю витривалості σ_{-1fr} , тобто напруцювання до кількості циклів N_o на границі витривалості σ_{-1fr} приводить до зародження тріщини граничної довжини, коли вона ще не розповсюджується. Такі тріщини на границі витривалості σ_{-1fr} в експериментах на фретинг-утому спостерігалися у дослідях [18]. Виходячи з цього, а також припускаючи, що вся крива втоми за критерієм зародження тріщини фретинг-утоми, коли долом зразків проводили на рівні границі витривалості σ_{-1fr} зміщується паралельно собі у бік більших довговічностей і при цьому проходить через точку з координатами (N_o, σ_{-1fr}) , була побудована крива

втомі за критерієм зародження тріщини фретинг-утоми, яка описується наступним рівнянням:

$$\lg N'_{ifr} = 10,4029 - 0,02917\sigma_a \quad (14)$$

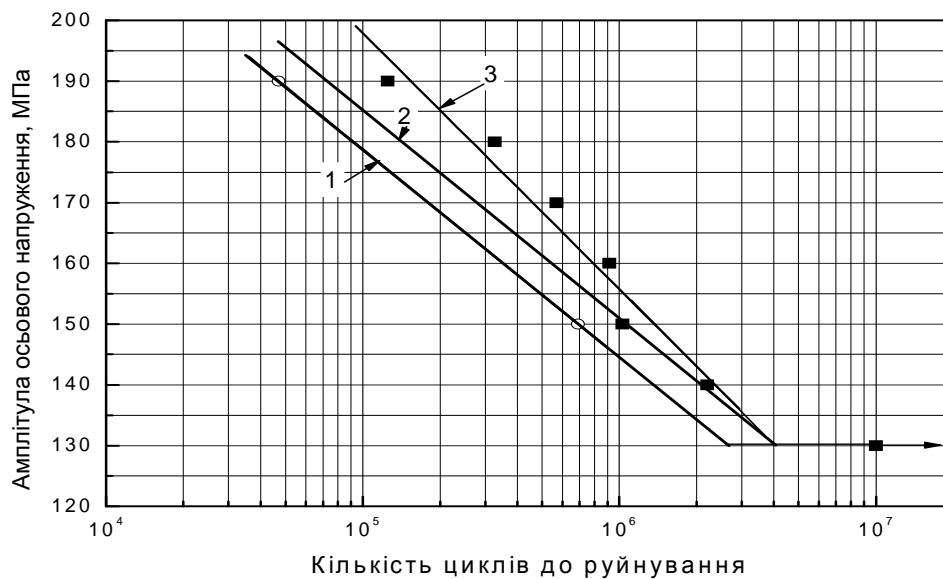


Рис. 3. Криві фретинг-утоми пари сталь 15кп – сталь 45 по зародженню тріщини (1, 2) і по кінцевому руйнуванню (3).

З цих даних витікає (рис.3, таблиця), що у відповідності з першою (експериментальною) кривою фретинг-втомі за критерієм зародження тріщини відносна довговічність N_{ifr}/N_{fr} змінюється в діапазоні значень 0,17...0,67 при зміні значень довговічності до повного руйнування в межах $1 \cdot 10^4 \dots 4,08 \cdot 10^6$ циклів. Використовуючи рівняння кривої фретинг-утоми за зародженням тріщини у вигляді $N'_{ifr} = f(\sigma_a)$ одержані відносні довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми у діапазоні значень 0,265...1,0, що відповідає приведеному вище діапазону зміни довговічності за критерієм повного руйнування зразка. З цих даних витікає, що стадія зародження тріщини фретинг-утоми займає значну частину повної довговічності у багатоциклової області і повинна бути врахованою у розрахункових методиках.

Висновки

1. Показана необхідність установлення зв'язку силових параметрів фретинг утоми з довговічністю до зародження тріщини, а не з повною довговічністю.
2. Запропонована методика експериментального визначення довговічності до зародження тріщини фретинг-утоми, яка є комбінацією модифікованого методу Френча і статистичного методу «вгору-вниз».
3. Виконана методична розробка застосована для визначення співвідношень між стадією зародження тріщини фретинг-утоми і повною довговічністю у парі сталь 15 кп – сталь 45. При повній довговічності $\sim 10^6$ циклів стадія зародження тріщини фретинг-утоми становить біля 50% цієї довговічності. Ця частка збільшується при подальшому пониженні амплітуди напруження до границі фретинг-утоми.
4. Проведені дослідження свідчать про необхідність першочергового врахування стадії зародження тріщини у процесі визначення довговічності при фретинг-утомі у області багато циклової утоми.

Література

1. French H. Fatigue and hardening of steel //Trans. Amer. Soc. Steel Treat. – 1933. – 21. – P. 899.
2. Цыбанев Г.В. Энергетическая трактовка результатов усталостных испытаний и ее использование для определения стадии зарождения трещины //Пробл.прочности. – 1994. – № 2. – С. 19-27.
3. Klesnil M. The degree of damage at the French curve and of the fatigue limit during oscilating bend loading //Metal Treatment and Drop Forging.–1965.- № 32.– P. 55-63.
4. Цыбанев Г.В., Кураш Ю.П. Экспериментальное и расчетное определение зарождения трещины при фреттинг-усталости //Вибрации в технике и технологиях. – 2004. - № 5 (37). – С. 33-37.
5. Цыбаньов Г.В., Кураш Ю.П. Взаємозв'язок напруженого стану в зоні фретингу з довговічністю до зародження тріщини утоми //Трибофатика. Праці симпозіуму. Тернопіль 23-27 вересня 2002. Том 1. – Тернопіль: тернопільський державний технічний університет ім. І.Пулюя, 2001. – С. 301-305.
6. Sato K. Damage formation during dretting fatigue //Wear. – 1988. – 125. – P. 163-174.
7. Szolwinski M., Farris T. Mechanics of Fretting Fatigue Crack Formation //Wear 1996. – N 198. – p. 93-107.
8. Dixon W.J., Mood A.M. A method for obtaining and analyzing sensitivity data. – Journal Amer. Statist. Ass. – 1948. - Vol. 43. P. 109 –126.
9. Вейбул В. Усталостные испытания и анализ их результатов. Пер с англ. Ред С.В.Серенсен – М.: Машиностроение, 1964. - 275 с. JSME Standard. Standard method of statistical fatigue testing. JSME S 002, 1981.
10. Brownlee K.A., Hodyes J.L., Rozenblatt M. The up-and-down method with small samples// J.Amer.Statist.Ass. 1953.- 48. - С. 262-277. Когаев В.П., Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977. - 232 с.
11. Когаев В.П., Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977. - 232 с.
12. 13 Когаев В.П., Усталость и несущая способность узлов и деталей машин при стационарном и нестационарном переменном нагружении. - М.: Машиностроение, 1968. - 134 с.
13. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. - М.: Машиностроение, 1972. - 232 с.
14. Иванова В.С.,Марьяновская Т.С. и Терентьев В.Ф. Ускоренный метод построения линии Френча с применением энергетических критериев усталости //Зав. лаб. – 1966. – № 2. – С. 225-228.
15. Klesnil M., Lukas P. Fatigue of metallic materials. – Prague: Academia, 1980.–222 p.
16. Трощенко В.Т., Драган В.И. Исследование влияния концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталостному разрушению сталей по критерию зарождения трещины //Пробл. прочности. – 1986. - № 12. – С. 3-8.
17. Трощенко В.Т., Драган В.И. Исследование деформационного гистерезиса при циклическом растяжении-сжатии и кручении //Пробл. прочности. – 1985. - № 4. – С. 21-26.
18. Hills D.A., Nowell D., and O'Connor J.J. On the mechanics of fretting fatigue //Wear. – 1988. – N 125. – P. 129-146.