

УДК 62-567.2

С.В. Бершак, канд. техн. наук, доц.,
С.І. Робу, спеціаліст,
Одес. нац. політехн. ун-т

ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ КОРОЗІЙНІЙ ВТОМІ В ІМОВІРНІСНОМУ АСПЕКТІ

С.В. Бершак, С.І. Робу. **Визначення опору корозійній втомі в імовірнісному аспекті.** Показано існування кореляційних зв'язків між параметрами рівняння, що описує залежність амплітуд напружень, які виникають в деталі на повітрі і в корозійному середовищі. Отримано залежність опору втомі деталей, що працюють в середовищах різної інтенсивності.

Ключові слова: опір корозійній втомі, агресивне середовище, ймовірність, критерій згоди.

С.В. Бершак, С.І. Робу. **Определение сопротивления коррозионной усталости в вероятностном аспекте.** Показано существование корреляционных связей между параметрами уравнения, описывающего зависимость амплитуд напряжений, возникающих в детали на воздухе и в коррозионной среде. Получена зависимость сопротивления усталости деталей, работающих в средах различной интенсивности.

Ключевые слова: сопротивление коррозионной усталости, агрессивная среда, вероятность, критерий согласия.

S.V. Bershak, S.I. Robu. **Determination of resistance to corrosion fatigue in a probabilistic aspect.** The existence of correlations between the parameters of the equation describing the dependence of the amplitudes of stresses arising in a detail in air, and in the corrosive environment, is shown. The dependence of fatigue resistance of parts operating in environments of varying intensity is obtained.

Keywords: corrosion fatigue resistance, aggressive environment, probability, goodness of fit.

Велика кількість механічного обладнання працює в умовах агресивних середовищ. Технологічні завдання, які виконуються за допомогою такого обладнання, обумовлюють підвищені вимоги до міцності його складових частин. Найбільшу кількість причин руйнування елементів механічного обладнання, що працює в агресивному середовищі, становить корозійна втома — один із найрозповсюдженіших видів руйнування металів. Практично всі сплави на основі Fe, Al, Mg, Cu, Ni, Ti та ін. металів за певних умов схильні до корозійної втоми, яка протікає за одночасної дії на них циклічних механічних навантажень та агресивного середовища.

Сформульовано такі ознаки і закономірності корозійної втоми руйнування металів: відсутність фізичної межі корозійної втоми металів, тобто постійне зниження руйнівного циклічно-змінного напруження зі збільшенням кількості циклів навантажень; відсутність кореляції між механічними властивостями металу, визначеними за статичного або циклічного навантажень, та межею корозійної втоми; відсутність кореляції між корозійною тривкістю металу в ненапруженому стані та межею корозійної втоми; підвищена, порівняно з повітрям, чутливість металу в корозійному середовищі до форми циклу і частоти навантаження; інверсія масштабного ефекту, тобто підвищення межі корозійної втоми вуглецевих і низьколегованих сталей та сплавів на основі алюмінію зі збільшенням поперечного перерізу металовиробу; зниження чутливості за корозійної втоми до мікрогеометрії поверхні деталі порівняно з випробуваннями на повітрі; специфічний багатоплощинний характер руйнування, що пов'язано із розвитком у початковий період руйнування великої кількості тріщин, а не однієї, як у повітрі; неадитивність впливу на корозійну витривалість концентрації напружень та корозивного середовища [1, 2].

Велика кількість ознак і закономірностей корозійної втоми руйнування металів обумовлює дослідження, присвячені визначенню опору корозійній втомі в імовірнісному аспекті як актуальну науково-прикладну задачу.

Зв'язок між амплітудами напружень в повітрі і в корозійному середовищі для різних довговічностей і агресивних середовищ описується лінійною залежністю [1]

$$\lg \sigma_{\text{сп}} = a + b \lg \sigma_{\text{пв}}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{сп}}$, $\sigma_{\text{пв}}$ — амплітуда напружень за кривими втоми в середовищі й повітрі відповідно для заданої кількості циклів N , тобто межі обмеженої витривалості;

a і b — параметри рівняння, які залежать від матеріалу деталі й ступеня агресивності корозійного середовища.

Метою роботи є визначення кореляційних зв'язків між параметрами рівнянь, що визначають залежність амплітуд напружень у повітрі і корозійному середовищі.

Аналіз параметрів a і b для різних конструкційних матеріалів, агресивності робочих середовищ, розмірів і форм деталей показує, що зі збільшенням параметра a параметр b убуває. Для подальшої обробки прийнято лінійний зв'язок параметрів у вигляді

$$a = \alpha - \beta b, \quad (2)$$

де α і β — постійні величини для заданого середовища визначеної агресивності.

Кореляційно-регресійний аналіз виразу (2) показав існування тісного зв'язку між величинами a і b , який характеризується коефіцієнтом кореляції r . Це вказує на функціональну залежність параметра a від b (див. таблицю).

Результати випробувань сталених деталей на корозійну втому

Агресивне середовище	α	β	r
Вода:			
дистильована	2,3983	2,4389	0,97
прісна	3,0314	2,8785	0,98
Розчин:			
NaCl (3%)	3,1392	2,8793	0,98
NaCl (4%)	2,6265	2,6803	0,99
KaCl (10%)	2,6592	2,7799	0,97
KaCl (20%)	2,5384	2,4359	0,98
H ₂ SO ₄ (0,1 н)	3,0096	2,7085	0,97
HNO ₃ (6,2%)	2,6773	2,5907	0,97
HNO ₃ (4%)	2,4948	2,6257	0,99
Агресивне середовище	α	β	r
KNO ₃ (10%)	3,2538	3,0102	0,99
NaOH (4%)	2,6405	2,8241	0,99

Як видно з таблиці, значення постійних α і β залежності (2) відрізняються несуттєво, що дозволяє об'єднати $a = f(b)$ в єдину залежність $a = F(b)$. До того ж висновку можна прийти при аналізі графічного зображення цієї залежності й характеру розміщення експериментальних точок на рисунку.

Для об'єднання вибірових значень a і b в загальну сукупність, єдину для всіх середовищ, необхідно перевірити дві гіпотези: рівність дисперсій ряду сукупностей і середніх значень нормально розподілених сукупностей.

При неоднаковій кількості спостережень в окремих вибірках однорідність дисперсій можливо перевірити за допомогою критерія Бартлета χ^2 [3]. Розрахункове значення критерію χ^2 порівнюють з табличним χ_{α}^2 , який знаходиться для вибраного рівня значимості й кількості ступенів вільності. При виконанні нерівності $\chi^2 \leq \chi_{\alpha}^2$ нульову гіпотезу про рівність генеральних дисперсій, з яких взяті ці вибірки, не відкидають.

Для вибірки з дев'яти середовищ значення критерію $\chi^2 = 2,28$, а його табличне значення для рівня значимості $\alpha = 0,01$ дорівнює 2,56, тобто вказана нерівність виконується, і дисперсію можливо об'єднати [3]: $S^2 = 0,9584$.

Гіпотезу про рівність середніх значень вибірок перевіряють за допомогою дисперсного відношення — критерію F [3]. Якщо розрахункове дисперсне відношення F буде менше його табличного значення $F_{1-\alpha}$ (для заданого рівня значимості й числа ступенів вільності), то гіпотеза не відхиляється.

Для заданого обсягу вибірки залежність $F=1,92$, а табличне значення $F_{1-\alpha} = 1,93$, тобто ці значення задовольняють нерівності $F \leq F_{1-\alpha}$. Отже, розходження параметрів α і β є для даної вибірки несуттєвим (статистично незначним), а вибірку між параметрами a і b виразу (1) можна об'єднати в одну і записати узагальнений для всіх досліджених середовищ вираз (2) у вигляді

$$a = 2,8064 - 2,775b. \quad (3)$$

Розрахункові значення величини a , які отримані за індивідуальними для кожного середовища зв'язками й узагальненою залежністю (3), незначно відхиляються від їх експериментальних значень. Причому погрішності визначення параметра a за індивідуальними зв'язками й узагальненою залежністю практично рівні, хоча мають окремі відхилення. Це дає підґрунтя рекомендувати для практичного використання взаємозалежність між величинами a і b у вигляді виразу (3), але в той же час не відкидає використання індивідуальних залежностей (2) (див. таблицю) для кожного з випробуваних середовищ.

Таким чином, для практичного використання функції (1) при оцінці опору втомі деталей, що працюють в середовищах різної агресивності, необхідно знати закон зміни параметра b в рівнянні (1) в залежності від матеріалу й виду корозійного середовища (рис. 1).

На основі отриманих результатів можливо створити обґрунтовану методику розрахунку на міцність і довговічність деталей при дії агресивних середовищ і оцінити довговічність таких деталей вже на стадії проектування.

З розвитком розрахунків міцності і довговічності в імовірнісному трактуванні характеристики розсіяння втомних властивостей сталі не менш важливими, ніж середні характеристики, що використовуються в детерміністичних розрахунках. Стосовно корозійних середовищ з'ясувалася певна закономірність розсіяння довговічності по відношенню до її розсіяння в повітрі. Якщо твердження про однорідність дисперсій логарифма довговічності за рівнями напружень для об'єктів, експлуатованих в повітрі, підтверджується в одних випадках і не підтверджується в інших, то для об'єктів, що працюють в корозійних середовищах, однорідність дисперсій не викликає сумнівів. На прикладі 3 %-го розчину кам'яної солі це було підтверджено: рівень навантаження не зробив статистично значущого впливу на розсіяння довговічності.

Вказане явище підтвердилося і при випробуванні зразків із сталі 45 і 12Х 18 10Т в досліджених рідких середовищах [2]. Випробування проводили в нерухомих камерах, які насаджуються на зразок, що обертається. Камери ретельно ущільнювали, так що залитий в них на початку випробувань розчин зберігався до поломки зразка і не замінювався. Тим самим умови випробувань наближали до реальних умов експлуатації багатьох об'єктів.

Беручи до уваги, що тенденція до деякого зменшення дисперсії логарифма довговічності із збільшенням рівня на-

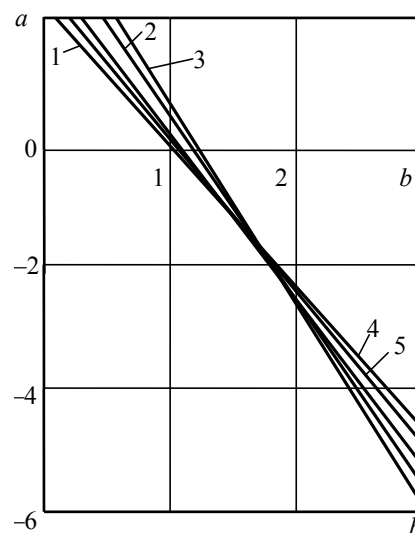


Рис. 1. Взаємозв'язок параметрів a і b рівняння (1): 1 — 10%-й розчин KNO_3 ; 2 — прісна вода; 3 — 10%-й розчин $CaCl$; 4 — 20%-й розчин $CaCl$; 5 — дистильована вода

вантаження зберігається для будь-якого середовища, криві корозійної втоми будувалася як з урахуванням, так і без урахування зміни умовних дисперсій, відповідних певним рівням навантаження, тобто при $\omega_i = 1$. Для врахування ваги змін використовували функцію [2]

$$\omega_i(x) = 10^{-2b_i \lg \sigma_i}$$

При цьому на підставі попереднього аналізу застосовували лінійний закон зміни умовних дисперсій із зміною рівня напружень згідно з виразом

$$\lg S_i = a_i \lg \sigma_i + b_i,$$

де a_i і b_i — постійні коефіцієнти.

На рис. 2 показані криві втоми зразків із сталі 45 в дистильованій воді при різній ймовірності руйнування, побудовані з урахуванням і без урахування зміни емпіричних умовних дисперсій за напруженнями. Аналогічні криві одержані і для інших корозійних середовищ зразків з інших матеріалів.

Як видно з рисунка, непервні і штриховані лінії розташовані близько одна до одної, особливо для середньомовірних кривих корозійної втоми. Це свідчить про те, що дисперсії статистично незалежні від напружень. Перевірка за допомогою критерію Бартлета дійсно показала статистичну незначущість розбіжностей умовних дисперсій логарифма довговічності при рівнях значимості, що набагато перевершують 0,05. Отже, інтенсивність навантаження не робить значного впливу на розсіяння довговічності для всіх досліджених рідких середовищ.

Дисперсія логарифма довговічності в конкретному корозійному середовищі практично не залежить від марки сталі й конструктивних особливостей об'єкта. Для 3%-го розчину кам'яної солі і морської води дисперсія логарифма довговічності дорівнює 0,01. Такою її можна приймати (з деяким надлишком) для найрізноманітніших об'єктів. Іншими словами, в розрахунках сталевих об'єктів, призначених для роботи в морській воді, можна призначати вказане узагальнене значення дисперсії логарифма довговічності або відповідне їй середньоквадратичне відхилення. Мабуть, це положення повинне залишатися в силі для будь-якого іншого рідкого середовища. Відсутність достатньої для статистичної обробки кількості опублікованих даних щодо дослідження опору втоми в корозійних середовищах, відмінних від 3%-го розчину кам'яної солі, не дозволяє дати рекомендації щодо кількісних значень дисперсій логарифма довговічності в них.

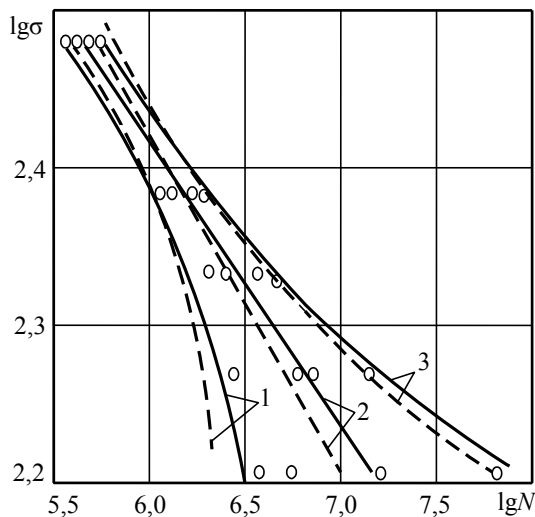


Рис. 2. Криві втоми, які побудовані з урахуванням зміни дисперсії довговічності (непервні лінії) і без нього (штрихові лінії) при ймовірності зруйнування $P=5(1)$, $50(2)$ і $95(3)$ %

Виявлено, що при переході від середовищ менш агресивних (дистильована вода) до агресивніших (розчини кислот) дисперсія логарифма довговічності зменшується. Однорідність ряду дисперсій для досліджених середовищ може бути прийнята лише при рівні значущості 0,001 і менше. Це означає, що гіпотеза однорідності ряду дисперсій для середовищ різної агресивності по суті повинна бути знехтувана. Отже, корозійне середовище робить значущий вплив на розсіяння довговічності, тобто розсіяння довговічності суттєво залежить від агресивності середовища.

На підставі одержаних даних можна вважати, що дисперсія логарифма довговічності в найбільш агресивних з досліджених середовищ (розчинах кислот) приблизно на 20 % менше, ніж в морській воді, а в дистильованій воді — на 10 % більше. Для решти середовищ, що займають проміжне положення відповідно до їх питомої електропровідності, її можна вибирати інтерполяцією, приймаючи як початкове значення 0,01 для морської води.

Побудова кривих корозійної втоми, які відповідають заданій ймовірності P зруйнування або ймовірності $1-P$ незруйнування, при умові нормального розподілу характеристик опору втомі, полегшується тією обставиною, що рівень напруження не має значимого впливу на дисперсію логарифма довговічності, а сама дисперсія залежить від конструктивних особливостей і матеріалу об'єкта. Відомо, що узагальнена дисперсія логарифма довговічності лежить в межах від 0,0080 до 0,0098 (в середньому приблизно 0,0093, що близько до 0,01) і що виходячи з цього значення можна підрахувати логарифм довговічності для будь-якої ймовірності P , якщо відомо середьомовірне його значення [2]. Це означає, що таким чином будується пучок паралельних кривих корозійної втоми для будь-якої ймовірності P або $1-P$ в інтервалі від 2 до 98 %, в якому можна впевнено користуватися нормальним розподілом і який більш ніж достатній для переважної більшості завдань машинобудування. Отже, побудувавши корозійну криву втоми розрахунковим шляхом й знаючи усереднену дисперсію логарифмів довговічності, легко отримати розрахункову оцінку й межі витривалості за заданою довговічністю.

Межу обмеженої витривалості на базі N , що відповідає ймовірності P , можна представити як

$$\sigma_{RP}^N = \bar{\sigma}_{RP}^{-N} + U_P S_{\sigma_R} = \bar{\sigma}_{RP}^{-N} (1 + U_P V_{\sigma_R}), \quad (4)$$

де $\bar{\sigma}_{RP}^{-N}$ — середньомовірне значення межі витривалості, визначається за середньомовірною кривою втоми на заданій базі N ;

U_P — квантиль нормального розподілу для ймовірності P ;

$S_{\sigma_R}, V_{\sigma_R}$ — середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації межі обмеженої витривалості.

Правомірно говорити і про нормальний розподіл логарифма межі обмеженої витривалості. Вираз для логарифма межі обмеженої витривалості записується аналогічно виразу (4). У відповідності до функції нормального розподілу для оцінки межі обмеженої витривалості з ймовірністю P можна використати нижнє значення довірчого інтервалу середнього рівня межі витривалості. Наприклад, приймаючи логарифмічно нормальний розподіл меж витривалості, можна записати

$$\lg \sigma_{RP}^N = \lg \sigma_{R\min}^N + U_P S_{\max}, \quad (5)$$

де $\sigma_{R\min}^N$ — нижнє значення довірчого інтервалу для середнього значення межі обмеженої витривалості при заданій довірчій ймовірності;

S_{\max} — верхнє значення інтервалу для середньоквадратичного відхилення меж витривалості і заданої довірчої ймовірності.

В практичних розрахунках зручною величиною є коефіцієнт варіації меж витривалості. Визначити цей коефіцієнт можна, заручившись потрібною базою N , за допомогою сім'ї кривих корозійної втоми. Легко упевнитись, що навіть у випадку паралельності кривих різної ймовірності коефіцієнт варіації меж витривалості буде залежати від абсолютного значення середньої межі витривалості, тобто бази N і нахилу кривих.

На основі проведених досліджень отримано кореляційну залежність між параметрами рівнянь корозійної втоми деталей машин в середовищах з різною агресивністю. Окрім цього, визначено чинники, що впливають на дисперсію обмежених меж витривалості деталей в корозійних середовищах.

Отримані результати підтверджують існування кореляційних зв'язків між параметрами рівняння, що описує залежність амплітуд напружень, які виникають в деталі на повітрі і в корозійному середовищі і можуть бути застосовані при розрахунках опору втомі деталей, які працюють в агресивних середовищах різної інтенсивності.

Література

1. Вольчев, А.В. Оценка сопротивления усталости стальных валов в коррозионных средах/ А.В. Вольчев, С.В. Бершак // Детали машин: Респ. межвед. научн.-техн. сб. — 1987. — Вып. 44. — С. 95 — 100.

2. Расчет деталей машин на коррозионную усталость / Н.В. Олейник, А.В. Вольчев, С.В. Бершак, Н.Р. Васильев. — К.: Техніка, 1990. — 150 с.
3. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.

Reference

1. Vol'chev, A.V. Otsenka soprotivleniya ustalosti stal'nykh valov v korroziionnykh sredakh [Evaluation of fatigue resistance of steel shafts in corrosive environments] / A.V. Vol'chev, S.V. Bershak // Detali mashin: Resp. mezhved. Nauchn.-tehn. sb. [Machine Parts: Repub. Interagency Sci. and Tech. Coll.] — 1987. — Issue 44. — pp. 95 — 100.
2. Raschet detaley mashin na korroziionnyuyu ustalost'. [Calculation of machine parts on corrosion fatigue] / N.V. Oleynik, A.V. Vol'chev, S.V. Bershak, N.R. Vasilev. — Kyiv, 1990. — 150 pp.
3. Stepnov, M. N. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh isptaniy: Spravochnik. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests: Reference book] / M.N. Stepnov — Moscow, 1985. — 232 pp.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Дащенко О.Ф.

Надійшла до редакції 14 вересня 2012р.