

## Методи оцінки корозійної втоми сталей та сплавів

В. І. Похмурський, М. С. Хома

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

*Проведено дослідження корозійно-утомного пошкодження нержавіючих сталей і сплавів на ранній стадії руйнування. Представлено аналітичні залежності між границею корозійної втоми пасивованих сталей і електрохімічними параметрами на стадії зародження тріщини.*

**Ключові слова:** корозійна втома, нержавіюча сталь, пошкодження, границя витривалості, тріщина.

Корозійно-утомне руйнування сталей та сплавів тісно пов'язане з електрохімічною взаємодією деформованого металу з середовищем. Це підтверджується численними експериментальними даними й існуючими гіпотезами корозійно-механічного руйнування, згідно з якими електрохімічний фактор є одним із головних у пошкодженні металів [1, 2]. Враховуючи важливість стадії зародження корозійно-утомних тріщин, основна увага була зосереджена на електрохімічних закономірностях, пов'язаних зі схильністю корозійно-тревких сталей до корозійної втоми.

**Матеріали та методи досліджень.** Випробування проводили на корозійно-тревких сталях різних класів. Зразки з діаметром робочої частини 5 мм деформували шляхом чистого згину з обертанням при частоті 50 Гц. Робочим середовищем служив 3%-ний розчин NaCl. Взаємодію деформованих сталей з корозійним середовищем вивчали з використанням електрохімічної комірки, яку встановлювали на утомну машину, що дозволяло в процесі накопичення пошкоджень проводити комплекс електрохімічних досліджень [3].

**Результати випробувань та їх обговорення.** Дослідження корозійної втоми нержавіючих сталей показали [3, 4], що між стадійністю руйнування та характером зміни електродного потенціалу і струму поляризації ( $i_{\text{пол}}$ ) існує щільна кореляція. Незважаючи на те, що при потенціалі поляризації, рівному потенціалу корозії ( $E_{\text{пол}} = E_{\text{кор}}$ ), за відсутності механічних напружень  $i_{\text{пол}} = 0$ , і лише руйнування пасивних плівок (поява ювенільного металу) призводить до його зростання, криві  $i_{\text{пол}} - N$  будуть характеризувати виключно роботу деформаційних гальванічних мікропар.

На кривих  $i_{\text{пол}} - N$  (рис. 1) можна виділити чотири основні ділянки, що характеризують окремі періоди руйнування зразків за різних навантажень [4]: *I* – розвиток зсувоутворення, розчинення мікродеформованих ділянок поверхні та утворення виразкоподібних пошкоджень, які є осередком зародження мікротріщини; *II* – підростання мікротріщин; *III* – ріст магістральної тріщини; *IV* – повне руйнування зразка.

На основі залежностей  $i_{\text{пол}} - N$  за тривалістю різних стадій корозійно-утомного пошкодження можна оцінити залишковий ресурс металу. Якщо критичні значення густини струму поляризації відомі, можна вчасно припинити експлуатацію конструкцій і запобігти аварійним ситуаціям. Наприклад

(рис. 1), при навантаженнях  $\pm\sigma = 220$  МПа зразок зі сталі 08Х18Н10Т руйнується через  $\sim 8,9 \cdot 10^6$  цикл деформування, ріст тріщини триває  $\sim 3 \cdot 10^5$  цикл ( $\sim 3,4\%$  довговічності зразка). Тобто можна вважати, що при досягненні густиною струму поляризації критичних значень ( $i_{\text{пол}} \cong 10^{-2}$ ) ресурс металу практично вичерпано.

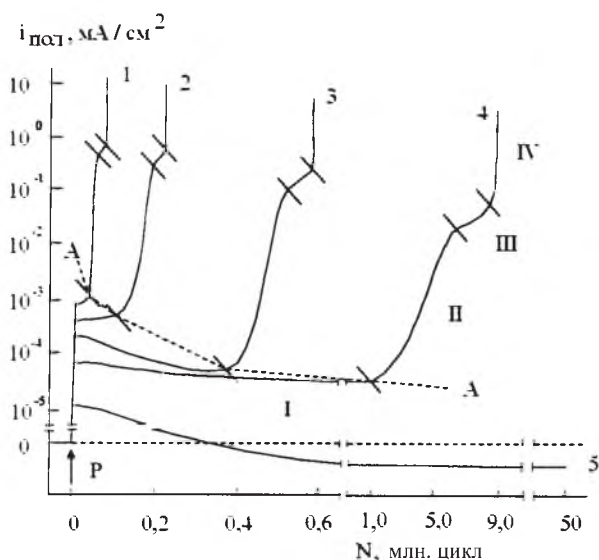


Рис. 1. Характер зміни густини струму поляризації ( $E_{\text{пол}} = E_{\text{кор}}$ ) при корозійно-утомному руйнуванні сталі 08Х18Н10Т за різних напружень: 1 –  $\sigma = \pm 320$  МПа; 2 –  $\sigma = \pm 280$  МПа; 3 –  $\sigma = \pm 240$  МПа; 4 –  $\sigma = \pm 220$  МПа; 5 –  $\sigma = \pm 210$  МПа. (P – навантаження.)

Разом із тим із рис. 1 видно, що за навантажень, рівних границі корозійної втоми ( $\sigma_{-1c}$ ), величина струму поляризації зменшується до нуля і змінює знак (крива 5). Однак це не призводить до зародження та розвитку протягом 50 млн. цикл корозійно-утомних тріщин [4]. Для інших нержавіючих сталей спостерігається аналогічна картина (рис. 2).

Аналіз кривих на рис. 2 показав, що при навантаженнях, рівних границі корозійної втоми, максимальне зміщення потенціалу складає всього 0,008... 0,020 В. Струм поляризації зростає до  $(0,9...1,6) \cdot 10^{-5}$  мА/см<sup>2</sup> і після  $\sim 120...500$  тис. цикл знижується до нуля і змінює знак. При цьому порівняно з початковими значеннями корозійні струми знижуються приблизно в 1,6–2,4 раза, потенціали пітінгоутворення зростають на  $\sim 0,02–0,06$  В, що свідчить про деяке покращання корозійної міцності сталей [5]. Однією з причин цього може бути те, що внаслідок циклічної деформації нержавіючих сталей відбувається селективне розчинення їх компонентів, що супроводжується зростанням поверхневої концентрації хрому і відповідно покращанням захисних властивостей пасивних плівок [6].

Дослідження характеру зміни електрохімічних характеристик при напруженнях  $\pm\sigma < \sigma_{-1c}$  показали, що початкові зміни потенціалу та струму поляризації не фіксуються для сталей 20Х13 при  $\pm\sigma \leq 30$  МПа, 08Х17Н6Т при  $\pm\sigma \leq 180$  МПа, 08Х18Г12Н5АБ при  $\pm\sigma \leq 200$  МПа [4]. Отже, пасивна

плівка не руйнується і корозійно-утомні пошкодження не утворюються. Випробування сталей за цих напружень протягом 150 млн. цикл не привели до їх руйнування, тобто досягнуто фізичну границю корозійної утоми. На основі отриманих результатів було розроблено прискорений метод оцінки рівня  $\sigma_{-1c}$  нержавіючих сталей [7]. Суть методу полягає в наступному: якщо після навантаження зразка струм поляризації  $i_{\text{пол}}$  буде змінюватися в області значень  $\sim 10^{-5}$  мА/см<sup>2</sup> і через деяку кількість циклів змінить свій напрям, то можна очікувати, що границя корозійної утоми буде в області цих напружень.

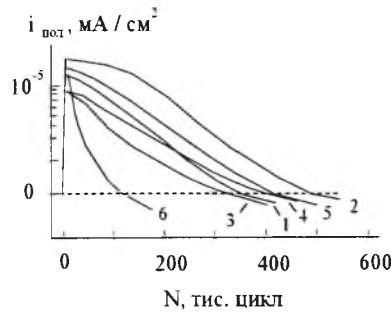


Рис. 2. Залежність струму поляризації ( $E_{\text{пол}} = E_{\text{кор}}$ ) від числа циклів деформування при  $\pm\sigma = \sigma_{-1c}$  для сталей 08X18H10T (1), 08X18Г12Н5АВ (2), 09X17H7Ю (3), 08X17H6T (4), 08X26H5M2 (5) і 20X13 (6).

Можливість існування фізичної границі корозійної утоми для пасивних металів підтверджують дослідження властивостей ніобію та цирконію в розчині 3% NaCl+HCl ( $pH = 2$ ): значення границі утоми та корозійної утоми для них збігаються, відповідно 180 і 260 МПа [5].

Подальший аналіз корозійно-утомного руйнування сталей проводили переважно з використанням закономірностей початкової стадії руйнування, що охоплює процеси утворення поверхневих мікротріщин (на рис. 1 ділянки кривих нижче лінії  $A-A$ ). Шляхом інтегрування ділянок кривих, що знаходяться нижче лінії  $A-A$ , було визначено кількість електрики ( $Q_{\text{зар}}$ ), що витрачається на додаткове розчинення металу при активації його поверхні внаслідок циклічного деформування на етапі утворення корозійно-утомних пошкоджень до зародження тріщин:

$$Q_{\text{зар}} = \int_0^{\tau_{\text{зар}}} i_{\text{пол}}(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Величина  $\alpha = Q_{\text{зар}}/Q_{\text{кор}}$  ( $Q_{\text{кор}} = i_{\text{кор}}\tau_{\text{зар}}$ ) характеризує відношення між розчиненням металу внаслідок циклічної деформації та у випадку її відсутності і відносне деформаційне розчинення сталей за певних рівнів механічних напружень. Із рис. 3, де представлено залежності  $\lg(Q_{\text{зар}}/Q_{\text{кор}}) - \pm\sigma$ , видно [8], що вони дуже подібні за формою до кривих корозійної утоми (дзеркальне зображення): зниження амплітуди циклічних напружень супроводжується зменшенням  $\lg \alpha$ , а на кривих  $\lg N - \pm\sigma$ , навпаки, – зростанням корозійної витривалості.

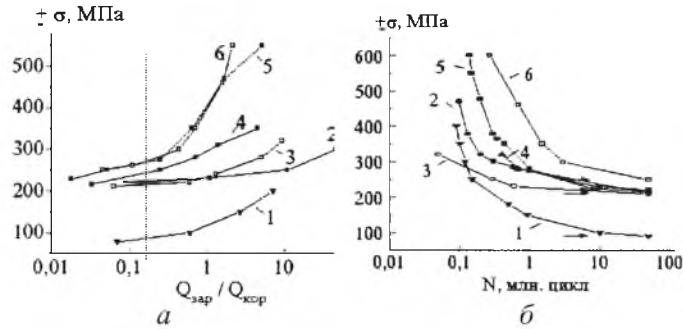


Рис. 3. Залежність відносного деформаційного розчинення від величини циклічних напружень (а) та криві втоми (б) сталей 20X13 (1), 08X18Г12Н5АБ (2), 08X18Н10Т (3), 08X26Н5М2 (4), 08X17Н6Т (5) і 09X17Н7Ю (6).

При амплітуді циклічних напружень, близьких до границі корозійної втоми, величина  $\lg \alpha$  знаходиться в інтервалі  $-1 \dots -2$  (або  $\alpha = 10^{-1} \dots 10^{-2}$ ). Тобто даний інтервал може бути критичним для цього відношення і визначати можливість розвитку корозійно-втомного руйнування: при  $\alpha < 0,01$  корозійно-втомне руйнування стає малоімовірним. Це вказує на можливість оцінки корозійної витривалості досліджуваних сталей за електрохімічними параметрами стадії зародження тріщин і знаходження електрохімічного критерію схильності таких сталей до корозійної втоми [8].

Якщо використати коефіцієнт зменшення сталі внаслідок впливу середовища при утомі  $\beta = \sigma_{-1c} / \sigma_{-1}$ , де  $\sigma_{-1}$  та  $\sigma_{-1c}$  – границя втоми на повітрі і в корозійному середовищі, то графік залежності  $\lg \alpha - \beta$  (рис. 4) показуватиме взаємозв'язок між схильністю нержавіючих сталей до корозійної втоми і значеннями електрохімічних параметрів, що характеризують стадію зародження тріщин. Значення  $\lg \alpha$  для сталі 20X13 порівняно з іншими сталями відхиляється від приблизно лінійної залежності. Це пояснюється тим, що при навантаженнях, рівних границі втоми на повітрі, для указаної сталі в 3%-ному розчині NaCl є характерним розвиток пітингової корозії, що спричиняє додаткову електрохімічну активацію і завищення значень  $\alpha$  [3]. У результаті аналізу залежності між  $\alpha$  та  $\beta$  отримано аналітичний вираз, який справджується з надійністю 0,975 і дозволяє розрахувати границю корозійної втоми:

$$\sigma_{-1c} = \sigma_{-1} [1,128 - 2,849 \lg(Q_{\text{зар}}/Q_{\text{кор}})]. \quad (2)$$

За формулою (2) було розраховано значення границі корозійної втоми, які порівнювалися з експериментальними (таблиця). Установлено, що вони відрізняються не більше ніж на  $\sim 8\%$ , що свідчить про їх практичну збіжність.

Перевірку отриманих відношень проводили на сталі аустенітно-мартенситного класу 08X17Н5М3, для якої значення границі втоми на повітрі та в 3%-ному розчині NaCl згідно з літературними джерелами [9] відповідно складають 500 і 185 МПа (таблиця). Розрахункові та експериментальні значення границі корозійної втоми для цієї сталі порівняно з іншими відрізняються приблизно на 7,5%. Це підтверджує правильність запропонованого

способу прогнозування  $\sigma_{-1}$  за електрохімічними параметрами стадії зародження тріщини. Для перевірки можливості розширення вищенаведених міркувань на інші сталі та сплави, що пасивуються в корозійному середовищі, аналогічні дослідження проводилися на сталях 15X2МФА та 15X2НМФА, що використовуються для корпусного обладнання реакторів АЕС, у водному розчині борної кислоти  $pH = 8$  при  $t = 80 \pm 3^\circ C$  [10]. Розрахункові значення  $\sigma_{-1c}$  відрізняються від експериментальних відповідно на 10,7 та 12,1%. Хоча в даному випадку похибка у визначенні  $\sigma_{-1c}$  дещо більша, ніж для нержавіючих сталей, все ж можна говорити про задовільний збіг результатів.

**Порівняння розрахункових і експериментальних значень границі корозійної утоми для нержавіючих сталей (3%-ний розчин NaCl)**

Сталь	$\sigma_{-1}$ , МПа	$Q_{зар}/Q_{кор}$	$\sigma_{-1c}$ , МПа		Похибка, %
			Експеримент	Розрахунок	
08X18Н10Т	240	1,30	210	193	8,1
08X18Г12Н5АБ	230	1,09	220	232	5,5
08X17Н6Т	470	1,71	228	222	2,6
09X17Н7Ю	460	1,59	250	251	0,4
10X26Н5М2	310	1,41	215	221	2,8
08X17Н5М3	520	1,80	185	200	7,5
15X2МФА	500	1,30	450	402	10,7
15X2НМФА	420	1,40	340	299	12,1

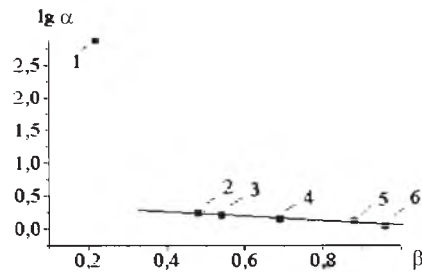


Рис. 4. Залежність відносного деформаційного розчинення протягом періоду зародження тріщин від коефіцієнта циклічної міцності за впливу середовища для сталей 20X13 (1), 08X17Н6Т (2), 09X17Н7Ю (3), 10X26Н5М2 (4), 08X18Н10Т (5) і 08X18Г12Н5АБ (6).

Цей приклад ще раз підтверджує адекватність формули (2), а також те, що відносне деформаційне розчинення можна вважати критерієм схильності корозійно-тривких сталей до корозійної утоми.

**Висновки**

1. Установлено існування взаємозв'язку між стадійністю корозійно-утомного руйнування сталей і сплавів та характером зміни струму поляризації, що дозволяє оцінювати ступінь їх пошкодження.

2. Висунуто гіпотезу, що в корозійному середовищі для корозійно-тривких сталей та сплавів, руйнування яких визначається утворенням пошкод-

жень внаслідок прискореного розчинення мікрореформованих ділянок поверхні, також може існувати фізична границя корозійної втоми.

3. Запропоновано і перевірено електрохімічний критерій корозійно-втомного руйнування пасивних металів, який ґрунтується на взаємозв'язку між границею корозійної втоми ( $\sigma_{-1c}$ ) і границею втоми на повітрі ( $\sigma_{-1}$ ) та відносним деформаційним розчиненням ( $Q_{\text{зар}}/Q_{\text{кор}}$ ). Він дозволяє прискорено оцінювати границю корозійної втоми за електрохімічними характеристиками періоду зародження поверхневих тріщин.

## Резюме

Проведено исследование развития коррозионно-усталостного повреждения нержавеющей сталей и сплавов на ранней стадии разрушения. Представлены аналитические зависимости между пределом коррозионной усталости пассивированных сталей и электрохимическими параметрами на стадии зарождения трещины.

1. Карпенко Г. В. К теории усталостного разрушения металла в коррозионных средах // Коррозионная усталость металлов. – Львов: Каменяр, 1964. – С. 5 – 15.
2. Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
3. Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома корозійно-твирких сталей і сплавів та їх зварних з'єднань // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. – Київ: Наук. думка, 1998. – С. 604 – 619.
4. Крохмальний А. М., Хома М. С., Похмурский В. И. Особенности коррозионно-усталостного разрушения и защиты нержавеющей сталей. – Львов, 1992. – 47 с. – (Препр./АН УССР. Физ.-мех. ин-т, № 183).
5. Похмурський В. І., Хома М. С. Передумови існування фізичної границі корозійної втоми корозійно-твирких сталей та сплавів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 6. – С. 63 – 68.
6. Похмурский В. И., Хома М. С., Антощак И. Н., Лапка И. Я. О влиянии циклических напряжений на селективное растворение сплавов // Защита металлов. – 1996. – 32, № 3. – С. 246 – 251.
7. Патент України № 50572А. Спосіб визначення границі корозійної втоми корозійностійких сталей / В. І. Похмурський, М. С. Хома, А. В. Залужець. – Опубл. 15. 10. 02, Бюл. № 10.
8. Похмурський В. І., Хома М. С. Механоелектрохімічні аспекти корозійної втоми нержавіючих сталей // Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів: Матеріали IV Міжнарод. конф.-виставки "КОРОЗИЯ-98". – С. 41 – 44.
9. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. В 2 ч. – Киев: Наук. думка, 1987. – Ч. 2. – 1303 с.
10. Похмурський В. І., Білий Л. М., Хома М. С. Корозійно-механічні властивості корпусних матеріалів реакторів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 3. – С. 111 – 118.

Поступила 27. 10. 2003