



ОЦІНКА КОРОЗІЙНО-ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЯК ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ

Академік НАН України **В. В. ПАНАСЮК**, чл.-кор. НАНУ **І. М. ДМИТРАХ**
(Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України)

Описаны разработанные экспериментально-аналитические методы оценки локальной коррозии и локального разрушения сварных соединений типа «антикоррозионная наплавка–корпусная сталь». Построенные диаграммы электрохимической стойкости и коррозионной трещиностойкости многослойных сварных соединений могут служить базой для оценки остаточного ресурса рассмотренных соединений.

Ключові слова: зварні конструкції, корпусна сталь, корозійно-втомлена міцність, гетерогенні системи, електрохімічні властивості, щільна корозія, втомна тріщина, металева модель, циклічна тріщиностійкість, узагальнюючі діаграми, залишковий ресурс

Проблема ефективного забезпечення надійності та довговічності відповідальних зварних конструкцій, що експлуатуються в умовах дії агресивних корозійних середовищ, залишається актуальною для енергетики, хімічної промисловості та інших галузей індустрії. Це пояснюється тим, що все ширшого застосування набувають матеріали чи елементи конструкцій, які з електрохімічної точки зору є гетерогенними системами, і виникнення та протікання в них корозійних процесів має складний багатостадійний характер. Типовим прикладом цього є зварні з'єднання з різнорідних матеріалів та елементи конструкцій із захисними антикорозійними наплавками. Як свідчить інженерна практика [1], для таких елементів конструкцій є характерною певна непередбачуваність процесів корозії та корозійно-механічної пошкоджуваності, що виникають внаслідок нерегламентованої зміни умов експлуатації, порушення технологічних режимів тощо.

Суттєвим недоліком існуючих підходів [2, 3] для оцінки втомної довговічності елементів конструкцій зварних з'єднань є формалізоване та достатньо обмежене врахування чинника агресивного експлуатаційного середовища. Корозійне середовище розглядається як постійний (незалежний) параметр, який характеризує тільки умови випробувань, що не відбиває адекватно фізико-хімічної ситуації в зоні зварного шва, яка є визначальною в суттєвому зниженні експлуатаційної надійності зварних з'єднань під дією робочих середовищ. У такій неоднорідній (гетерогенній) системі, з тим чи іншим ступенем імовірності, може протікати цілий спектр, часто конкуруючих між собою, фізико-хімічних процесів, що призводять до деградації механічних властивостей зварного з'єднання як шляхом інтенсивного анодного розчинення матеріалу (виникнення пітингів, корозійних

виразок і т. п.), так і шляхом водневого окрихчення зварної зони (прискорення процесів утворення мікротріщин та зародження і розвиток макротріщин).

Враховуючи такі особливості, в роботі запропоновано методи оцінки корозійної стійкості та корозійно-втомної міцності такого специфічного зварного з'єднання, як «двошарова антикорозійна наплавка–корпусна сталь» [4], яке широко застосовується для протикорозійного захисту корпусних конструкцій в енергетиці та нафтопереробці.

Об'єкт та мета досліджень. Основу зварного з'єднання складала корпусна сталь 15X2МФА (1), на поверхню якої наплавлено два шари антикорозійних наплавок: перший із сталі 07X25Н13 (2) товщиною приблизно 4 мм і другий — 04X20Н10Г2Б (3) товщиною близько 3,5 мм (рис. 1, табл. 1).

Метою даних досліджень було встановлення електрохімічної поведінки окремих складових зварного з'єднання та зон їх сплавлення, а також визначення базових параметрів його корозійної циклічної тріщиностійкості. Методологічною основою досліджень були оригінальні методи фізико-хімічних та фізико-механічних досліджень, розроблені в ФМІ НАН України [5]. Всі дослідження проведено в 1 %-му водному розчині H_3BO_3 з додаванням КОН до рН 8 ($T = 25...80\text{ }^\circ\text{C}$), що був моделлю так званої реакторної води борного регулювання [6]. Частота корозійно-втомних вип-

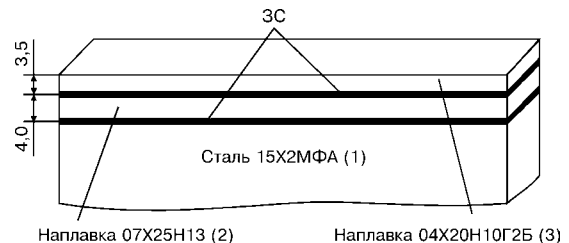


Рис. 1. Схема зварного з'єднання

Таблиця 1. Хімічний склад компонентів зварного з'єднання «двошарова антикорозійна наплавка–корпусна сталь»

№ з/п	Матеріал	Масова частка елемента, %						
		C	Cr	Ni	Mn	Cu	V	Fe
1	Сталь 15X2МФА	0,15	2	—	—	< 1	< 1	Решта
2	Наплавка 07X25Н13	0,07	25	13	—	—	—	»»
3	Наплавка 04X20Н10Г2Б	0,04	20	10	2	—	—	»»



робовувань становила $f = 0,017$ Гц при коефіцієнті асиметрії циклу навантаження $R = 0$. Для порівняльної оцінки впливу корозійного середовища на ріст втомних тріщин в досліджуваному з'єднанні проведено також випробування на повітрі ($f_1 = 1$ Гц, $R = 0$, $T = 25$ °С).

Оскільки в досліджуваному зварному з'єднанні, як у відповідній гетерогенній системі, найбільш потенційно небезпечними є зони сплавлення (ЗС) між матеріалами, то в першу чергу важливо оцінити їх реальний розмір (товщину). Для цього був використаний рентгеноструктурний аналіз зон сплавлення з метою встановлення розподілу в них таких базових елементів, як хром, нікель та марганець. Сканування проводили в діапазоні 1 мм ($\pm 0,5$ мм від видимої лінії розділу матеріалів з'єднання). За результатами сканування будували залежності «масова частка елемента у відсотках — діапазон сканування у мікрометрах» і на їх основі оцінювали протяжність відповідних зон сплавлення. Встановлено, що товщина зони сплавлення між наплавками 04X20H10Г2Б та 07X25H13 становить приблизно 300 мкм, а для зони сплавлення «наплавка 07X25H13 — корпусна сталь 15X2МФА» — в межах 150 мкм.

Електрохімічні характеристики матеріалів та зон сплавлення. Вольт-амперометричні дослідження [5, 7] окремих матеріалів з'єднання та зон їх сплавлення реалізовували шляхом пошарового зрізу зразка. З одержаних потенціодинамічних поляризаційних кривих визначали такі електрохімічні характеристики: потенціал корозії E_k та густину струму корозії i_k як параметри, що описують стан металевої поверхні за умови вільного кородування, а також анодні b_a та катодні b_k коефіцієнти Тафеля як якісні параметри реалізації початкових електрохімічних механізмів при відхиленні потенціалу на поверхні зразка в анодний чи катодний бік [8, 9].

Встановлено, що всі визначені базові параметри вказують на високу електрохімічну активність корпусної сталі 15X2МФА порівняно з матеріалами наплавки. Параметри зони сплавлення між корпусним матеріалом та наплавкою 07X25H13 займають проміжні значення щодо матеріалів, що її

утворюють. Матеріал в зоні сплавлення між двома наплавками має значно нижчі показники корозійної стійкості, ніж самі матеріали наплавки. При цьому зафіксовано, що значення потенціалу корозії (рис. 2, а) для базової сталі є нижчими від таких параметрів для наплавки на 250...300 мВ. Зона сплавлення між базовою сталлю та наплавкою 07X25H13 має потенціал корозії, близький до базової сталі. Значення потенціалу корозії зони сплавлення між двома наплавками досягає $-0,490$ В, що на 100...170 мВ нижче порівняно із такими параметрами для самих наплавки (відповідно $-0,320$ В для сталі 04X20H10Г2Б та $-0,390$ В для сталі 07X25H13). Аналіз густин струму корозії (рис. 2, б) показав, що для базової корпусної сталі їх значення коливаються в межах $0,0057$ А/м², а для наплавки 04X20H10Г2Б — не перевищують $0,0054$ А/м². Найнижчі значення густини корозійних струмів зафіксовано для випадку наплавки 07X25H13 ($i_k = 0,0023$ А/м²). Слід зазначити, що в зоні сплавлення між двома наплавками густина струму корозії досягає значення $0,0067$ А/м². Отже, в цій зоні електрохімічні процеси будуть протікати з найбільш високою швидкістю і вона є потенційно небезпечною зоною з точки зору корозійної стійкості.

Електрохімічна поведінка з'єднань «антикорозійна наплавка-корпусна сталь» в умовах щільної корозії. Випадки щільної корозії в елементах конструкції є досить поширеними в експлуатаційних умовах і вважаються одними з найбільш небезпечних щодо корозійної пошкоджуваності металів [10]. З метою вивчення умов щільної корозії в зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка-корпусна сталь» була змодельована плоска щілина, яка утворювалась двома поверхнями досліджуваного матеріалу [4]. Фіксована ширина щілини (0,12 мм) створювалась за допомогою інертної півки. При випробуваннях одна поверхня щілини під'єднувалась до потенціостата і являла собою робочий електрод (потенціал якого змінювався), а друга залишалась у стані вільної корозії. В результаті одержано анодні поляризаційні криві для складових матеріалів досліджуваного зварного з'єднання (наплавки 07X25H13

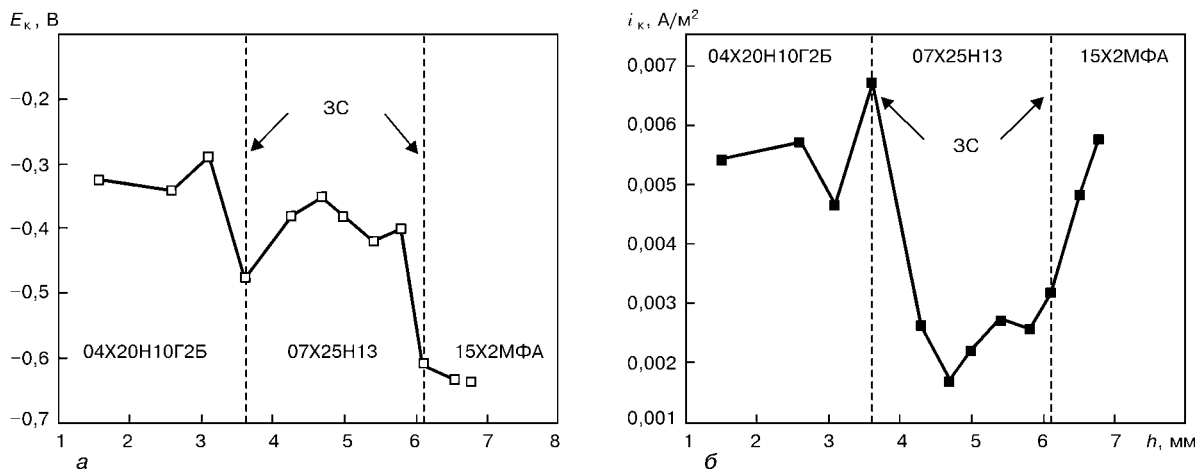


Рис. 2. Зміна потенціалу корозії (а) та густини струму корозії (б) від глибини зрізу зварного з'єднання «антикорозійна наплавка-корпусна сталь»

Таблиця 2. Порівняння значень потенціалів корозії E_k та густин граничних струмів $i_{гр}$ для випадків досліджень відкритої поверхні та у щілині

Матеріал	Об'єкт досліджень	E_k , В	$i_{гр}$, А/м ²	$\frac{i_{гр}(щілина)}{i_{гр}(поверхня)}$
15Х2МФА	Поверхня	-0,539	0,0334	5,31
	Щілина	-0,467	0,1772	
07Х25Н13	Поверхня	-0,330	0,0102	5,34
	Щілина	-0,397	0,0545	
04Х20Н10Г2Б	Поверхня	-0,422	0,00995	14,27
	Щілина	-0,469	0,1423	

та 04Х20Н10Г2Б, корпусна сталь 15Х2МФА) в умовах щілинної корозії, які були порівняні з аналогічними поляризаційними кривими, одержаними для випадку відкритої поверхні. На основі цих кривих визначено відповідні значення потенціалу корозії E_k та густин граничних струмів $i_{гр}$ [5] для випадків відкритої поверхні та щілини (табл. 2). З одержаних результатів видно, що для досліджуваного з'єднання «антикорозійна наплавка-корпусна сталь» анодні процеси в щілинах протікають значно інтенсивніше порівняно з відкритою поверхнею. Тут особливо слід наголосити на випадку щілинної корозії для наплавки 04Х20Н10Г2Б, де інтенсивність анодних процесів у щілині є більш як на порядок вищою порівняно з інтенсивністю цих процесів на відкритій поверхні.

Математична модель та аналітична оцінка електрохімічної корозії зварного з'єднання як багатоелектродної системи. Розглянемо [11, 12] корозійну виразку кругової циліндричної форми, яка проникає через двохшарову наплавку в базовий матеріал (рис. 3).

Запишемо необхідні в наступному розгляді два співвідношення для визначення густини i струму корозії. Перше з них [8, 9] таке:

$$i = (E_c - E)/b, \quad (1)$$

де E , E_c — рівноважний та стаціонарний (тобто встановлений при протіканні електричного струму) електродні потенціали; b — питомий поляризаційний опір.

З другого боку згідно з означенням електродного потенціалу як різниці електричних потенціалів металевої поверхні та електроліта на межі подвійного електричного шару можна записати так:

$$E_c = \psi_m - \psi_c, \quad (2)$$

де ψ_m , ψ_c — потенціали металу та електроліту. Оскільки електропровідність металу приблизно в 10^6 разів більша за електропровідність електроліту, то можна вважати, що

$$\psi_m = \text{const} \cong 0. \quad (3)$$

На основі рівностей (1)...(3) одержимо друге співвідношення для визначення i

$$i = -(E + \psi_c)/b. \quad (4)$$

Внутрішня поверхня виразки є триелектродною системою. Для дослідження в ній струму корозії введемо, як це зроблено в роботі [13], z — складову

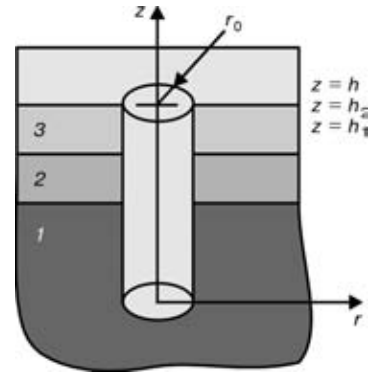


Рис. 3. Схема корозійної виразки

сумарного через переріз виразки електричного струму $i(z)$ та усереднений електричний потенціал $\psi(z)$, тобто виразку з точки зору електричних процесів будемо розглядати як довгу лінію. Такий підхід прийнятний, якщо поперечні розміри виразки малі проти її глибини [13]. Складемо для $i(z)$ і $\psi(z)$ балансові рівняння. З цією метою розглянемо зміну величин $i(z)$ і $\psi(z)$, коли $i(z)$ і z зростає на dz . В такому разі зміну di сумарного струму, коли z одержує приріст, обумовлено стоком (витоком) по боковій поверхні виразки, згідно із співвідношеннями (4), можна записати так:

$$di(z)/dz = -2\pi r_0 [E(z) + \psi_c(z)]/b(z). \quad (5)$$

В рівнянні (5) і надалі електричний потенціал середовища приймається постійним по перерізу, тобто $\psi_c(r, z) = \psi_c(z)$. Із закону Ома для стовпчика середовища висотою dz маємо

$$d\psi_c/dz = -i(z)/(\pi r_0^2 k), \quad (6)$$

де k — питома електропровідність середовища.

Розглянемо тепер величину $\psi_c(z)$. Продиференціюємо з цією метою рівність (6) по z і підставимо в неї $di(z)/dz$ з рівності (5). Тоді одержимо

$$[d^2/dz^2 - s^2(z)] \psi_c(z) = s^2(z) E(z), \quad (7)$$

де

$$s(z) = \sqrt{2/[r_0 k b(z)]}. \quad (8)$$

В нашому випадку для кожної n -ї області ($n = 1, 2, 3$ відповідно для областей $0 < z < h_1$, $h_1 < z < h_2$, $h_2 < z < h$) рівноважні електродні потенціали E_n і питомі поляризаційні опори b_n вважаємо сталими. Введемо в розгляд нові функції:

$$\psi_n = \psi_c + E_n. \quad (9)$$

Тоді з рівняння (7) одержимо

$$(d^2/dz^2 - s_n^2) \psi_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \quad (10)$$

де

$$s_n = \sqrt{2/[r_0 k b_n]}. \quad (11)$$

Густина струму корозії згідно із співвідношеннями (4) і (9) буде



$$i_n = -\psi_n/b_n. \quad (12)$$

Конкретні значення коефіцієнтів s_n і відповідні розв'язки рівнянь (10) залежать від того, якими є питомі поляризаційні опори анодними чи катодними, а це визначається співвідношеннями між рівноважними електродними потенціалами і поляризаційними опорами окремих матеріалів та геометричними параметрами системи.

Якщо анодний і катодний опори кожного окремого електрода рівні один одному, то, підставивши їх значення в співвідношення (10)...(12), з них при відповідних граничних умовах (вони будуть сформульовані нижче) можна визначити для кожного електрода струми корозії, в тому числі і їх знак, і тим самим встановити, чи є анодом або катодом даний електрод. В загальному випадку, коли анодний і катодний опори є різні для конкретного n -го електрода, при виборі b_n необхідно заздалегідь знати, чим є в розглядуваній системі даний електрод: анодом чи катодом. Частково це питання вирішується на основі порівняння величин рівноважних електродних потенціалів окремих електродів. Проілюструємо це на прикладі, в якому $E_1 < E_2 < E_3$. Звідси випливає, що основний матеріал — анод, верхній шар покриття — катод, а нижній шар може бути в загальному випадку частково анодом і частково катодом. Розглянемо цей випадок. Нехай z_0 — границя розділу цих ділянок. Очевидно, що катодною ділянкою другого матеріалу повинна бути прилегла до першого ($h_1 < z < z_0$), а анодною — прилегла до третього матеріалу ($z_0 < z < h_2$). Тоді область щілини ($0 < z < h$) розіб'ється на чотири підобласті, в яких розв'язки рівнянь (10) будуть такими:

$$\begin{aligned} \psi_{1a}(z) &= c_1 \exp(-s_{1a}z) + d_1 \exp(s_{1a}z), \quad 0 < z < h_1, \\ \psi_{2k}(z) &= c_{2k} \exp(-s_{2k}z) + d_{2k} \exp(s_{2k}z), \quad h_1 < z < z_0, \\ \psi_{2a}(z) &= c_{2a} \exp(-s_{2a}z) + d_{2a} \exp(s_{2a}z), \quad z_0 < z < h_2, \\ \psi_3(z) &= c_3 \exp(-s_{3k}z) + d_3 \exp(s_{3k}z), \quad h_2 < z < h. \end{aligned} \quad (13)$$

Тут

$$\begin{aligned} s_{1a} &= \sqrt{2/[r_0 k b_{1a}]}, \quad s_{2k} = \sqrt{2/[r_0 k b_{2k}]}, \\ s_{2a} &= \sqrt{2/[r_0 k b_{2a}]}, \quad s_{3k} = \sqrt{2/[r_0 k b_{3k}]}, \end{aligned} \quad (14)$$

b_{na} і b_{nk} ($n = 1, 2, 3$) — питомі анодні та катодні поляризаційні опори n -го матеріалу. Таким чином, в рівняннях (13) дев'ять невідомих величин: $c_1, d_1, c_{2k}, d_{2k}, c_{2a}, d_{2a}, c_3, d_3, z_0$. Вони визначаються з граничних умов при $z = 0$ і $z = h$, умов неперервності при $z = h_1, h_2, z_0$.

1. Умова при $z = 0$ (дно виразки). Повний струм із дна згідно із співвідношенням (4) буде $i_{(z=0)} = -\pi r_0^2 (E_1 + \psi_{c(z=0)})/b_{1a}$. Підставимо в цю рівність $i_{(z=0)}$ із рівняння (6) та врахуємо рівність (9), одержимо

$$(d\psi_1/dz - v_0\psi_1)|_{z=0} = 0, \quad v_0 = (kb_{1a})^{-1}. \quad (15)$$

2. Умова при $z = h$ (верх виразки). Згідно з роботою [9, формула (19)] та наведеним вище (9) маємо

$$\begin{aligned} (d\psi_3/dz + v_h\psi_3)|_{z=h} &= 0, \\ v_h &= (1 - 2I(q))/(2kb_{3k}I(q)), \end{aligned} \quad (16)$$

$$F(q) = \int_0^\infty \frac{I_1^2(\lambda)d\lambda}{\lambda(1+q\lambda)}, \quad q = kb_{3k}/r_0,$$

де $I_1(\lambda)$ — функція Бесселя 1-го роду 1-го порядку. Відзначимо, що рівність (16), як показано в [9], враховує інтегрально електронейтральність системи — виразка+торцева поверхня ($r_0 < r < \infty, z = h$).

3. Умови при $z = h_1, z = h_2$ виражають неперервність потенціалу $\psi_c(z)$ та $d\psi_c(z)/dz$. З урахуванням (9) ці умови мають вигляд

$$(\psi_1 - \psi_{2k})|_{z=h_1} = E_1 - E_2, \quad d((\psi_1 - \psi_{2k}))/dz|_{z=h_1} = 0, \quad (17)$$

$$(\psi_{2a} - \psi_3)|_{z=h_2} = E_2 - E_3, \quad d((\psi_{2a} - \psi_3))/dz|_{z=h_2} = 0. \quad (18)$$

4. Три умови при $z = z_0$. Дві з них витікають з рівності нулеві густини анодного і катодного струмів в цій точці. Згідно із співвідношеннями (12) вони мають вигляд

$$\psi_{2k}(z_0) = 0, \quad \psi_{2a}(z_0) = 0, \quad (19)$$

третья — із неперервності $d\psi_c(z)/dz$

$$[d\psi_{2a}(z)/dz - d\psi_{2k}(z)/dz]|_{z=z_0} = 0. \quad (20)$$

Таким чином, система співвідношень (12)...(20) визначає густину корозійних струмів на внутрішній поверхні виразки. Система рівнянь (15)...(20) може не мати дійсних розв'язків. Це означає, що другий електрод (нижній шар покриття) є повністю анодом або повністю катодом. В основному така ситуація буде в розглядуваному нижче випадку. Очевидно, що при наявності в покритті більше двох шарів представлений вище метод може бути також застосований, якщо врахувати на нових границях розділу умови, аналогічні умовам (17) і (18).

Представлений вище аналітично-числовий метод не застосовний, коли дно виразки знаходиться на рівні границі розділу металів (наприклад $h_1 = 0$). В цьому випадку область $0 < z < h_1$ випадає, і в співвідношеннях (13) треба виключити ψ_{1a} , а процес у виразці описувати функціями ψ_{2a}, ψ_{2k} та ψ_3 . При цьому слід враховувати дію першого матеріалу тільки через дно виразки ($z = h_1 = 0$) формулюванням тільки для дна граничної умови, виведення якої дається нижче.

Повний струм із дна згідно зі співвідношеннями (4) і (9) буде

$$i_{(z=0)} = -\pi r_0^2 (E_1 + \psi_{2(z=0)} - E_2)/b_{1a}, \quad (21)$$

а згідно із (6) і (9) —

$$i_{(z=0)} = -(\pi r_0^2 k) d\psi_2/dz|_{z=0}. \quad (22)$$

З рівностей (21) і (22) одержуємо умову на дні виразки

$$(d\psi_2/dz - v_0\psi_2)|_{z=0} = v_0(E_1 - E_2), \quad v_0 = (kb_{1a})^{-1}, \quad (23)$$

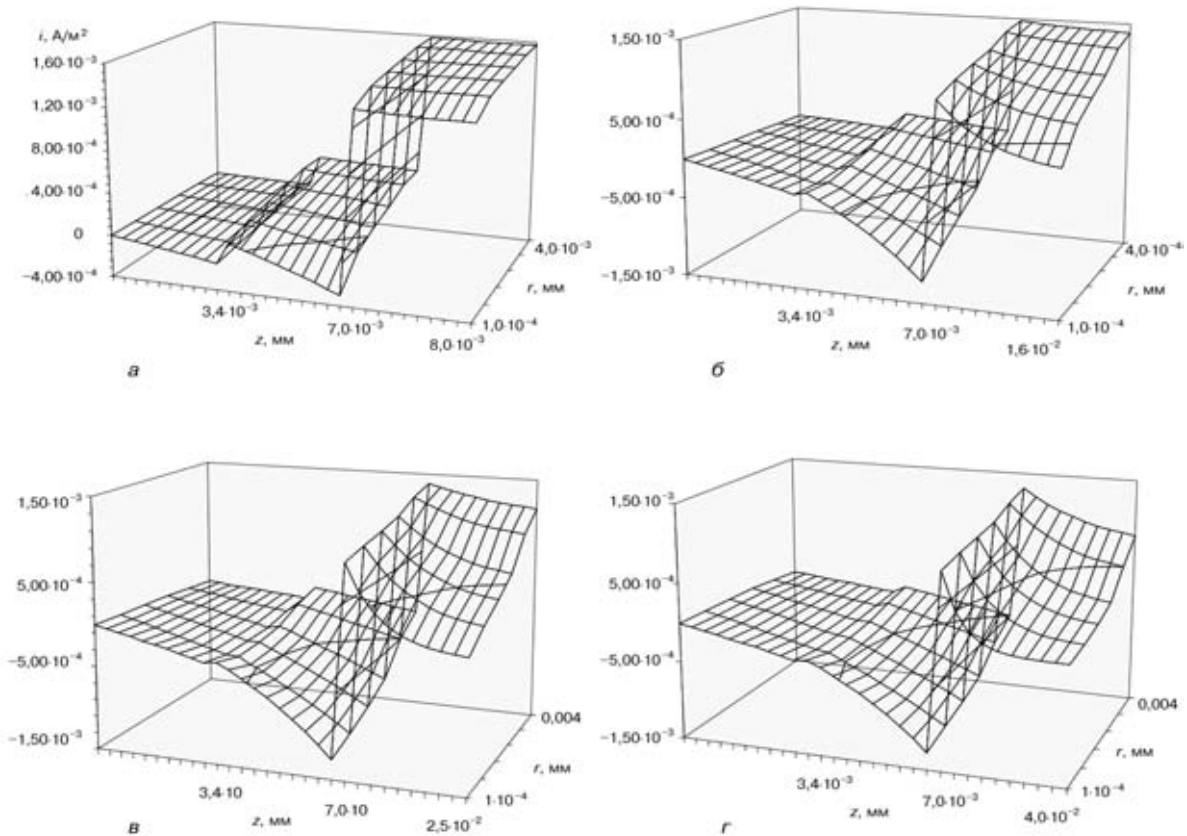


Рис. 4. Густина корозійного струму з поверхні циліндричної виразки змінного радіуса r та сталої глибини h у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка – корпусна сталь»: а – $h = 8$; б – 16; в – 25; г – 40 мм

яка заміняє умову (15). Рівності (17) виключаються із системи умов.

Продемонструємо реалізацію викладеного методу для оцінки густини струму корозії з поверхні циліндричної виразки змінного радіуса r та сталої глибини h у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Розглядали виразки різних розмірів, а саме: радіусом $r_0 = (0,1 \div 4,0)$ мм та загальною глибиною $h = 8; 16; 25; 40$ мм. Робочим середовищем служив 1-й % водний розчин $H_3BO_3 + KOH$ до рН 8 з електропровідністю $k = 1/6(OM \cdot m)^{-1}$, що є моделлю реакторної води борного регулювання [6]. Для розрахунків методами стандартних потенціостатичних вимірювань [7] експериментально визначено рівноважні електродні потенціали матеріалів зварного з'єднання: $E_1 = -0,345$, $E_2 = -0,165$, $E_3 = -0,149$ В та їх питомі поляризаційні опори в $OM \cdot m^2$: $b_{1a} = 120$; $b_{2k} = 130$; $b_{2a} = 45$; $b_{3k} = 80$.

Результати обчислень представлено на рис. 4, як розподіл густини корозійних струмів із бокової поверхні виразки по осі z дано від розкриття (крайні ліві точки) до дна (крайні праві точки). Одержані дані показують, що незалежно від глибини виразки базовий матеріал завжди є анодом і при збільшенні глибини виразки в ньому, густина анодного струму зменшується. При невеликому прониканні виразки в основний матеріал обидва шари наплавки є катодами, але при загальній глибині виразки $h \geq 15$ мм прилеглий до основного матеріалу шар наплавки частково стає анодом. При цьому в усьому

діапазоні зміни радіусів виразки ($0,1 \leq r_0 \leq 4,0$) мм із збільшенням r_0 густина анодного струму зростає.

Отже, залежно від розмірів виразки можлива реалізація різних комбінацій «анод–катод» у зварному з'єднанні як в багатоелектродній системі. Таким чином, виникнення різних електрохімічних умов і визначатимуть характер корозійно-втомного руйнування такої гетерогенної системи.

Електрохімічні умови у корозійно-втомних тріщинах при їх різному розташуванні у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». З метою оцінки електрохімічних механізмів впливу середовища на процес корозійно-втомного руйнування даного зварного з'єднання були проведені дослідження електрохімічних умов, що можуть виникати у корозійно-втомних тріщинах при різному їх розташуванні щодо матеріалів з'єднання та зон сплавлення. Для цього випробувано п'ять партій зразків, що відрізняються довжиною початкової втомної тріщини: в першій партії вершина тріщини була розміщена в наплавці 04X20H10Г2Б, в другій партії – в зоні сплавлення між наплавками 04X20H10Г2Б і 07X25H13, в третій партії в наплавці 07X25H13, в четвертій партії – в зоні сплавлення між наплавкою 07X25H13 і корпусною сталлю 15X2МФА, в п'ятій партії – в корпусній сталі 15X2МФА. Це дозволило встановити електрохімічні умови у вершині стаціонарної тріщини окремо для кожної складової зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь».



Таблиця 3. Стабілізовані значення електрохімічних параметрів pH_{BC} та E_{BC} на базі випробувань 100 год

Матеріал	pH_{BC}	E_{BC} , мВ	Механізм розчинення	
			ВО	АР
04X20H10Г2Б	10,9	-500	-	+
ЗС-I	9,6	-495	-	+
07X25H13	9,2	-505	-	+
ЗС-II	6,0	-500	+	+
15X2МФА	9,8	-525	+	+

Примітка. ВО — водневе окрихчення; АР — анодне розчинення металу.

Локальні електрохімічні дослідження в порожнинах втомних тріщин були здійснені за спеціальною методикою з використанням вимірних міні-капілярів [5]. За результатами досліджень встановлено часові залежності зміни водневого показника середовища pH_B та електродного потенціалу E_B у вершині тріщин при їх різному розташуванні щодо складових з'єднання та зон сплавлення. На їх основі були визначені усталені (стабілізовані) значення зазначених електрохімічних параметрів pH_{BC} та E_{BC} на базі випробувань 100 год (табл. 3).

На основі одержаних значень pH_{BC} та E_{BC} електрохімічні умови в корозійно-втомних тріщинах різноманітного розташування нанесено на діаграму термодинамічної стійкості води [14]. Це дало змогу оцінити термодинамічну ймовірність протікання тих чи інших електрохімічних реакцій у вершині тріщин, і тим самим оцінити ймовірність реалізації механізму анодного розчинення металу та водневого окрихчення при корозійно-втомному руйнуванні компонентів зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Встановлено (табл. 3), що у всіх досліджених випадках електрохімічні умови у вершині стаціонарної статично навантаженої тріщини сприяють протіканню електрохімічної корозії, а отже, й дії механізму анодного розчинення, при його найбільшій інтенсивності для корпусної сталі 15X2МФА. Утворення водню в результаті електрохімічних реакцій у вершині тріщини, а отже, і реалізація механізму водневого окрихчення термодинамічно можлива лише для тріщин, вершини яких розташовані у зоні сплавлення «наплавка 07X25H13–корпусна сталь 15X2МФА», а також у самій корпусній сталі 15X2МФА.

Особливості розвитку втомних тріщин у зварному з'єднанні «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» та узагальнені діаграми його циклічної корозійної тріщиностійкості. Відомо, що при профілактичних оглядах енергетичних реак-

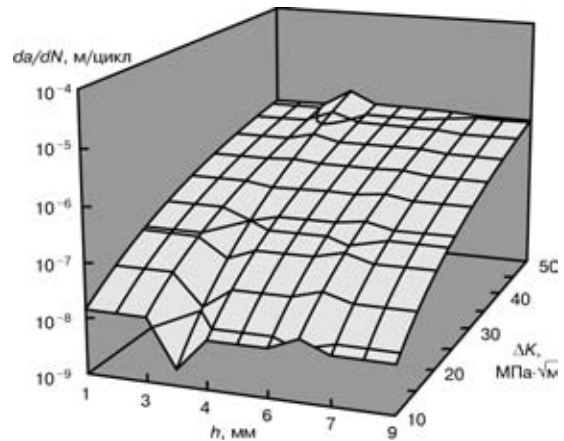


Рис. 5. Узагальнена діаграма циклічної тріщиностійкості зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» (повітря, $f = 1$ Гц, $R = 0$)

торів виявлено, що в процесі їх експлуатації в антикорозійній наплавці утворюються корозійно-втомні тріщини [15], які розвиваючись можуть проникнути в основний матеріал корпусу реактора. Тому для оцінки безпечної експлуатації (роботоздатності) таких об'єктів, а також призначення своєчасних термінів їх профілактичних оглядів, необхідні дані про циклічну корозійну тріщиностійкість матеріалів та зон сплавлення зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь».

З цією метою були реалізовані такі випробування. За спеціальною методикою [5], що забезпечувала сталість електрохімічних умов у вершині корозійно-втомної тріщини, були експериментально встановлені інваріантні [16, 17] діаграми циклічної тріщиностійкості ($da/dN - \Delta K_I$ діаграми) досліджуваних матеріалів і зон сплавлення зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Під час експериментів частота циклічного навантаження зразків становила $f = 0,017$ Гц, що є найбільш близьким до реальних експлуатаційних умов енергетичних реакторів [15]. Як базис, були визначені також діаграми циклічної тріщиностійкості матеріалів зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» на повітрі, коли частота навантаження $f = 1$ Гц, а коефіцієнт асиметрії циклу $R = 0$ (рис. 5). Результати досліджень представляли залежностями швидкості росту втомної тріщини da/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_I . Одержані експериментальні дані аналітично описано за допомогою відомої степеневі залежності Періса [16]:

$$da/dN = C(\Delta K_I)^n, \quad (24)$$

Таблиця 4. Значення констант у рівнянні (24) для опису діаграм циклічної тріщиностійкості матеріалів та зон сплавлення зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» при різних умовах випробування

Матеріал	Повітря, $f = 0,1$ Гц			pH 8, $f = 0,017$ Гц		
	C	n	R^2	C	n	R^2
04X20H10Г2Б	$3 \cdot 10^{-11}$	2,68	0,98	$1 \cdot 10^{-13}$	4,67	0,92
ЗС-I	$8 \cdot 10^{-14}$	4,37	0,99	$2 \cdot 10^{-14}$	5,05	0,84
07X25H13	$5 \cdot 10^{-12}$	3,17	0,98	$1 \cdot 10^{-13}$	4,45	0,91
ЗС-II	$2 \cdot 10^{-11}$	2,79	0,98	$2 \cdot 10^{-16}$	6,08	0,88
15X2МФА	$7 \cdot 10^{-12}$	3,04	0,98	$2 \cdot 10^{-13}$	4,02	0,87

де C , n — константи системи «матеріал–середовище» і умов випробувань. Для розглянутих умов випробувань їх значення наведено в табл. 4.

На цій основі розраховано узагальнені діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості, що дозволяють оцінювати та прогнозувати розвиток втомних тріщин як в да-

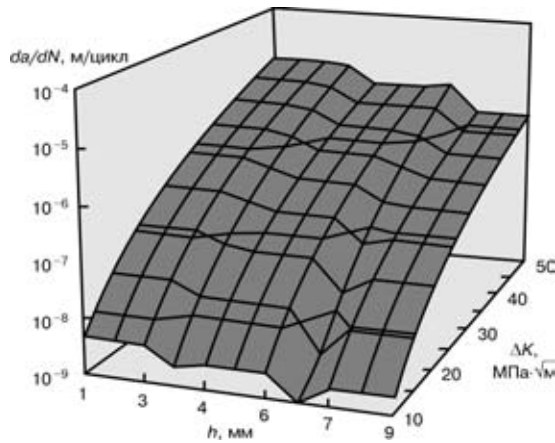


Рис. 6. Узагальнена діаграма циклічної корозійної тріщиностійкості зварного з'єднання «антикорозійна наплавка–корпусна сталь» (середовище рН 8; 80 °С; $f = 0,017$ Гц; $R = 0$)

ному зварному з'єднанні в цілому, так і в його окремих елементах залежно від умов випробувань (рис. 5, 6).

З одержаних результатів витікає, що наявність водного робочого середовища суттєво змінює параметри циклічної тріщиностійкості матеріалів та зон сплавлення зварного з'єднання як в якісному, так і в кількісному сенсі. В даному випадку їм властиві риси, що характерні для корозійної втоми з одночасною дією процесу корозійного розтріскування під напруженням [5, 16]. За цих умов найнижчу циклічну корозійну тріщиностійкість має наплавка 04X20H10Г2Б, а найвищу — корпусна сталь 15X2МФА. Наплавка 07X25H13 займає проміжне місце, і це властиво для всього досліджуваного діапазону швидкостей росту корозійно-втомної тріщини. При цьому циклічна корозійна тріщиностійкість зон сплавлення є вищою від тріщиностійкості суміжних матеріалів. Особливо це помітно для зони сплавлення «наплавка 07X25H13–корпусна сталь 15X2МФА» у низькоамплітудній області діаграми. Зростання рівня прикладеного навантаження (збільшення значення) призводить до втрати зоною сплавлення характеристик міцності й у високоамплітудній області діаграми швидкість росту тріщини в ній є вищою ніж у наплавці 07X25H13 та сталі 15X2МФА.

Висновки

1. Розроблено нові експериментально-аналітичні методи оцінки локальної корозії та локального руйнування зварних з'єднань типу «антикорозійна наплавка–корпусна сталь». Сформована розрахункова модель та аналітично-чисельний метод визначення густини корозійних струмів на поверхні кругової циліндричної виразки у зварному з'єднанні, що являє собою багатопарове тіло, і показано, що густина корозійного струму з поверхні циліндричної виразки в такому тілі зростає із збільшенням радіуса виразки,

The paper describes experimental-analytical methods of evaluation of local corrosion and local fracture of welded joints of the type of «anticorrosion cladding–casing steel». The constructed diagrams of electrochemical resistance and corrosion crack resistance of multilayer welded joints may be the basis for evaluation of the residual life of the considered joints.

а також зменшується із ростом глибини проникання виразки в базовий матеріал. При цьому встановлено також, що при всіх глибинах виразки базовий матеріал є анодом.

2. Побудовано діаграми електрохімічної стійкості та корозійної тріщиностійкості багатопарових зварних з'єднань типу «антикорозійна наплавка–корпусна сталь», які є базовими для оцінки залишкового ресурсу такого з'єднання, та розробки інженерно-технічних заходів для запобігання їх корозійно-механічних пошкоджень в умовах довготривалої експлуатації.

1. *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів* // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2002. — Спец. випуск № 3. — Т. 1–2.
2. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components* // ISO Standard Proposal. Intern. Inst. of Welding; XIII-1539-96. — XV-845-96.
3. *Eurocode 3 «Design of steel structures» and National Application Document — Part 1-1: General rules and rules for buildings. — Chapter 9: Fatigue.* — 1992. — P. 22-311-9.
4. *Дослідження та оцінка процесів корозійного руйнування зварних з'єднань різної геометрії на основі розгляду локальних синергетичних чинників концентрації напружень та робочого середовища в зоні зварного шва* // НДР № 0100U004860: ФМП ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2002. — 193 с.
5. *Дмитрах І. М., Панасюк В. В.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. — Львів: Вид. ФМП ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 1999. — 341 с.
6. *Никитин В. И.* Исследование коррозионной стойкости стали в водном теплоносителе ВВЭР с борным регулированием // Энергомашиностроение. — 1980. — № 3. — С. 21–24.
7. *Фрейман Л. И., Макаров В. А., Брыскин И. Е.* Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите. — Л.: Химия, 1972. — 240 с.
8. *Скорчелетти В. В.* Теоретическая электрохимия. — Л.: Госхимиздат, 1963. — 608 с.
9. *Скорчелетти В. В.* Теоретические основы коррозии металлов. — Л.: Химия, 1973. — 263 с.
10. *Розеифельд И. Л.* Коррозия и защита металлов (локальные коррозионные процессы). — М.: Металлургия, 1970. — 448 с.
11. *Колодій Б. І., Дмитрах І. М., Білий О. Л.* Метод еквівалентного електрода при визначенні корозійних струмів в тріщинах і щілинах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2002. — № 5. — С. 27–31.
12. *Дмитрах І. М., Колодій Б. І., Білий О. Л.* Визначення густини електрохімічного струму з поверхні корозійних виразок в тришаровому матеріалі // Там же. — 2003. — № 3.
13. *Turnbull A., Ferris F. H.* Mathematical modelling of the electrochemistry in corrosion fatigue cracks // Corrosion Chem. Pits, Crevice and Cracks: Procon. Conf. Teddington, 1–3 Oct., 1984. — London, 1987. — P. 357–395.
14. *Pourbaix M.* Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solution. — Oxford: Pergamon press, 1966. — 174 p.
15. *Анализ размеров дефектов в сварных корпусах энергетического оборудования и их влияние на сопротивление разрушению* / В. В. Аниковский, В. А. Игнатов, Б. Т. Тимофеев и др. // Вопр. судостроения. Сер. Сварка. — 1982. — № 34. — С. 17–32.
16. *Panasjuk V. V.* Strength and fracture of solids with cracks. — Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute. — 2002. — 468 p.
17. *Панасюк В. В., Ратвич Л. В., Дмитрах И. Н.* Определенные базовых диаграмм циклической коррозионной трещиностойкости сталей с учетом экстремальных электрохимических условий в трещине // Докл. АН СССР. — 1986. — 266, № 5. — С. 1128–1131.

Надійшла до редакції 07.05.2003