

ЕЛЕКТРОХІМІЯ РОСТУ МАКРОТРИЩИНИ ЯК АВТОНОМНОЇ СТАДІЇ ПРОЦЕСУ КОРОЗІЙНОЇ ВТОМИ У ТИТАНОВИХ СПЛАВАХ

Олег Калахан, д. т. н.

Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: oleg.kalakhan@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.114>

Калахан О. Електрохімія росту макротріщини як автономної стадії процесу корозійної втоми у титанових сплавах

Механізм і кінетику корозійновтомного руйнування титанових сплавів вивчали електрохімічними методами: зміни електродного потенціалу E при деформуванні зразків (залежності $E-\Delta K$), зовнішньої поляризації (залежності $E_{pot}-\Delta K$). Вивчено електрохімічні процеси на свіжоутворених поверхнях за час $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с їх взаємодії з розчином хлориду натрію різної концентрації (0,1; 0,5; 1,0 і 1,5 N розчини NaCl). Ідентифіковано, на основі кореляційних змін поверхні та електродного потенціалу, основні етапи процесу корозійної втоми титанових сплавів різного структурно-фазового стану. Показано, що свіжоутворені поверхні сплавів при втомі проявляють усі властивості матеріалу, здатного переходити в пасивний стан. Активація поверхні циклічно деформованих сплавів супроводжується значним знешляхетненням електродного потенціалу ($-1,2$ В) та різким збільшенням струму (159 А/м²). Регенерації пасивності притаманна триетапна зміна потенціалу і струму. Характер змін кривих *струм-час* недеформованих і циклічно деформованих сплавів однаковий, однак в останніх струм знижується інтенсивніше.

За умов плоскої деформації залежність стабілізованого значення електродного потенціалу E_{st} від ΔK прямолінійна. Концентрація розчину підсилює або послаблює структуру сплавів. Збільшення ролі електрохімічного чинника при корозійній втомі доведено дослідженнями ефективності електрохімічного захисту: при катодній поляризації можливо повністю призупинити процес корозійновтомного росту тріщини. Необхідне зміщення потенціалу до захисного значення, за якого сповільнюється ріст втомної тріщини, становить при ΔK до $4,5$ МПа \sqrt{M} – $0,25 \dots 0,29$ В від потенціалу корозії. У водних розчинах аміаку зразки сплаву можуть бути катодно захищені від корозійновтомного руйнування за поляризації $\Delta E > 0,25$ В, при цьому час до руйнування сплаву зростає у два рази. Проаналізовано кінетику та механізм корозійновтомного руйнування титанових сплавів.

Ключові слова: титанові сплави, електродний потенціал, поляризація, деформація, механізм, електрохімічна кінетика.

Kalakhan O. Electrochemistry of macrocrack growth as an autonomous stage of the corrosion fatigue process in titanium alloys

The mechanism and kinetics of corrosion-fatigue fracture of titanium alloys are considered using the electrochemical investigations: the change of electrode potential E during specimens deformation (dependences $E-\lg N$ and $E-\Delta K$), external polarization (dependences $E_{pot}-\Delta K$). The electrochemical processes on the fresh surface (FS) for time $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ s of their interaction with sodium chloride solutions of different concentration (0.1; 0.5; 1.0 and 1.5 N solution) are studied. Basing on the correlation changes of the surface and the electrode potential, main stages of corrosion fatigue of titanium alloys of different structural and phase state have been indentified, It has been shown that FS of the alloys demonstrate all the properties of the material that can pass into the passive state. Activation of the alloy surface is accompanied by significant discharge of the electrode potential ($-1,2$ V) and a sharp increase of current (159 A/m²). The repassivation is characterized by a three-stage change of both the potential and the current. The variation of the curve «current–time» with deformation and without deformation is the same, however, under the deformations influence the current decreases more rapidly. Under plane strain conditions, the dependence of the stabilized electrode potential E_{st} on ΔK is of a rectilinear type. The solution concentration either increases or decreases the alloy structure. The increasing role of the electrochemical factor during corrosion fatigue is proved by the results of electrochemical protection effectiveness: during cathodic polarization the process of corrosion-fatigue crack propagation can be completely arrested. The kinetics and the mechanisms of corrosion-fatigue fracture of titanium alloys are analyzed.

Key words: titanium alloys, electrode potential, polarization, deformation, mechanism, electrochemical kinetic.

Постановка проблеми. Корозійно-механічне руйнування конструкційних металевих сплавів можна розбити на низку періодів [1; 2; 8], тривалість яких залежить від природи металу, структурно-напруженого стану досліджуваного

об'єкта, умов його навантаження. Фізично розділити ці періоди досить важко, проте такий умовний розподіл доцільно зберегти для полегшення вивчення кінетики корозійно-механічного руйнування. Тому останніми роками інтенсивно ведуть

пошук нових кінетичних підходів до оцінки корозійно-механічного руйнування конструкційних матеріалів [2–4; 10; 11], які ґрунтуються на законах механіки руйнування, електрохімії, фізики твердого тіла, фізики металів та інших фундаментальних наук. Для вивчення періодів руйнування, зокрема першого, використовують металографію, рентгенографічний, магнетометричний, резистометричний, акустичний, електрохімічний та інші аналізи, що фіксують зміну тонкої структури й фізико-хімічного стану поверхневих шарів металу [1; 2; 5; 11; 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наявні декілька причин доцільності вивчення закономірностей росту макротріщини як автономної стадії процесу корозійної втоми [11]. Кількісні дані про стадію росту тріщини сукупно з інтегральною оцінкою довговічності без тріщиноподібних концентраторів уможливають одержання опосередкованих відомостей про тривалість та особливості стадії зародження тріщини. Електрохімічні дослідження в цьому разі, зокрема накладання зовнішнього потенціалу в процесі випробувань металу на витривалість у корозійних середовищах, розглядають як непрямий засіб оцінки вірогідного механізму руйнування. Про зростання ролі електрохімічних чинників при корозійній втомі сплаву можна стверджувати і за ефективністю електрохімічного захисту. На сплавах за наявності катодного захисту можна повністю загальмувати процес корозійновтомного росту тріщини [10]. Традиційні методи вивчення корозійно-механічного руйнування металів ґрунтуються на визначенні кількості циклів навантажень або часу до руйнування зразків, що циклічно деформуються в корозійному середовищі, коли задані амплітуда змінних напруг або деформації [8]. Хоча такий підхід і дає цінну інформацію щодо довговічності виробів, проте не вдається глибше проаналізувати стабільність руйнування.

Постановка завдання. Наше завдання – узагальнити закономірності росту макротріщини, як автономної стадії процесу корозійної втоми конструкційних титанових сплавів, виявлених електрохімічними методами, та оцінити роль електрохімічних чинників при корозійній втомі в процесі накладання зовнішнього потенціалу поляризації для оцінки вірогідного механізму руйнування.

Матеріали і методика досліджень. Механізм і кінетику корозійновтомного руйнування

титанових сплавів ми досліджували за зміною електродного потенціалу E під час деформації зразків (залежності $E-\Delta K$ [6; 7]), у процесі накладання зовнішнього потенціалу поляризації на зразок (залежності $E_{pot}-\Delta K$ [9; 13]).

Випробовували на втому зразки із псевдо- α сплаву ПТ-3В. Електродом порівняння був насичений хлоро-срібний електрод. Використовували потенціостат П-5848.

Характеристики опору корозійновтомному руйнуванню сплаву за зовнішньої поляризації визначали з такими особливостями:

підтримували сталу швидкість росту корозійної тріщини випробуваннями зразків, які забезпечували постійність параметра ΔK , що уможливило багаторазові виміри довжини тріщини за незмінних параметрів випробувань;

розглядали незмінними зовнішні щодо тріщини як геометричного об'єкта чинники: концентрацію початкового корозійного середовища у випробувальній камері, значення електродних потенціалів на поверхні зразка;

обмежували для максимального унеможливлення спаду потенціалу поляризації у тріщині, проти поверхні, її довжину величиною близько 0,5 висоти зразка.

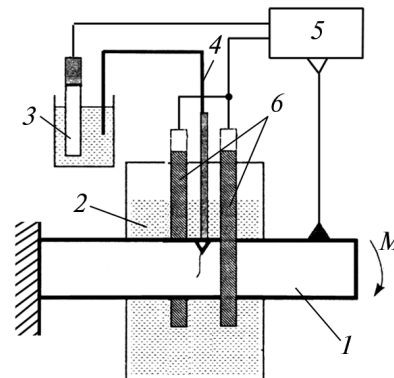


Рис. 1. Принципова схема електрохімічної поляризації корозійновтомної тріщини:

1 – зразок; 2 – камера з корозійним середовищем; 3 – допоміжні електроди; 4 – електрод порівняння; 5 – мікроелектрод для вимірювання електродного потенціалу металу

Fig. 1. Electrochemical polarization of corrosion fatigue crack (schematically):

1–specimen; 2–chamber with corrosive environment; 3–auxiliary electrode; 4–reference electrode; 5–microelectrode for measuring the electrode potential of the metal

Інформацію про вплив поляризації на швидкість росту втомної тріщини одержано накладан-

ням зовнішнього потенціалу поляризації в діапазоні $E = 0,6 \dots -1,5$ В (рис. 1). На зразку 1 з тріщиною встановлено робочу камеру 2 з корозійним середовищем. Зразок жорстко навантажувався; мікроелектрод 5 для вимірювання потенціалу металу E , електролітично зв'язаний зі стандартним електродом порівняння 4, розміщений у площині тріщини.

Вольт-амперометричні дослідження корозійної тріщини проводили в околі вершини тріщини певної площі, виокремленої на покритому хімічно стійкою плівкою зразку. У камері симетрично до тріщини закріплено два допоміжні (платинові) електроди 3. Завдяки циркуляції склад корозійного середовища сталий. Задане значення потенціалу E у вершині тріщини підтримували за допомогою потенціостата 6, змінюючи струм у колі «зразок – допоміжний електрод». Дослідження проводили за трьохелектродною схемою, в якій робочим електродом був метал в околі вершини тріщини. Значення електродного потенціалу в околі вершини тріщини вимірювали з використанням фторопластового електролітичного ключа, розміщеного в зоні розвитку тріщини та зв'язаного з електродом порівняння, що був у додатковому об'ємі. Точність вимірювання потенціалу $\pm 0,2$ мВ.

Виклад основного матеріалу. Зразки з попередньо утвореною тріщиною. Ми вивчали розвиток корозійних тріщин, використовуючи лінійну механіку для спостереження за кінетикою їхнього росту й електрохімічні методи для вивчення механізму корозійновтомного руйнування. Кінетика електродного потенціалу у випадку корозійно-циклічної тріщиноотривкості інтегрально відображає суть електрохімічних процесів на межі поділу деформований метал – середовище.

Зміна електродного потенціалу на зразках із попередньо утвореною тріщиною. У процесі дослідження циклічної тріщиноотривкості титанових сплавів виявлено залежність електродного потенціалу від величини ΔK у діапазоні $\Delta K > \Delta K_{th}$ до величини ΔK_{2-3} [4; 5]: зміщення E в негативну область значень у початковий момент із подальшою стабілізацією його значень з ростом тріщини (рис. 2) інтенсивніше для більш напруженого стану (ΔK) у вершині тріщини. Стабілізація потенціалу зі збільшенням величини ΔK настає в області від'ємніших його значень.

Проте час досягнення стабілізованого значення потенціалу E_{st} , який становить приблизно 10...30 с, практично не залежить від величини ΔK . Зміщення електродного потенціалу в область

від'ємних значень зумовлене не тільки утворенням під час росту корозійновтомних тріщин «свіжих» поверхонь у вершині тріщини, а й активацією поверхні контактною взаємодією берегів, що утруднює інтерпретацію впливу корозійного середовища на основі зміщення електродного потенціалу. Встановлено, що залежність між величиною E_{st} та логарифмом розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK – лінійна (рис. 3) [4; 14].

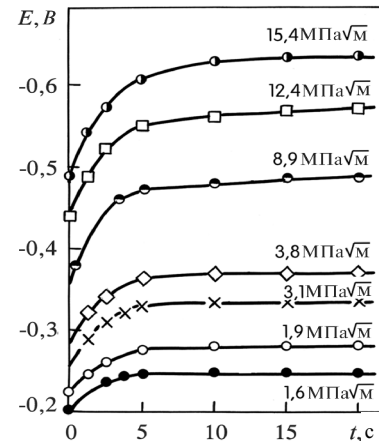
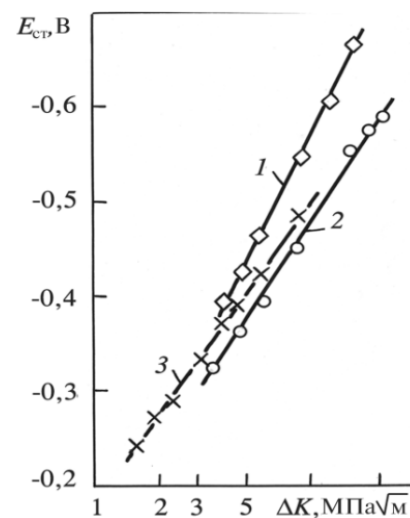


Рис. 2. Зміна електродного потенціалу сплаву ПТ-3В пластинчастої структури з часом за різних ΔK в 10 %-му розчині аміаку
Fig. 2. Change in the electrode potential of the PT3B alloy of lamellar structure over time at different ΔK in a 10 % ammonia solution



1 – 1 %-й розчин аміаку, глобулярна структура; 2 – 1 %-й, пластинчаста структура; 3 – 10 %-й, пластинчаста структура

Рис. 3. Залежність стабілізованого значення електродного потенціалу E_{st} від ΔK
Fig. 3. Dependence of the stabilized value of the E_{st} electrode potential on ΔK

Структура сплаву, концентрація водного розчину аміаку впливають на цю залежність, підсилюючи або послаблюючи її. Кути нахилу прямих близькі, що дозволило припустити близькість значень ефективної енергії активації процесу росту втомної тріщини та ідентичність механізму її розвитку. Для з'ясування цього й уточнення ролі електрохімічного чинника при корозійній втомі визначали вплив поляризації на швидкість росту втомних тріщин.

Вплив поляризації на ріст втомних тріщин у титановому сплаві. Інформацію про вплив поляризації на швидкість росту втомної тріщини одержано накладанням зовнішнього потенціалу поляризації в діапазоні $E = 0,6 \dots -1,5$ В (див. рис. 1). Електрохімічну поляризацію вмикали після стабілізації швидкості росту втомної тріщини при конкретному значенні величини ΔK . Вплив поляризації кількісно оцінювали відношенням $N = V_n / V_0$, де V_n – швидкість росту тріщини після вмикання поляризації, V_0 – вихідна швидкість росту тріщини. Поріг втоми ΔK_{th} сплаву ПТ-3В пластинчастої грубозернистої структури в 1 %-му розчині аміаку становить $1,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. При $\Delta K \geq 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ швидкість росту тріщини досягла $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл.

Дію електрохімічної поляризації вивчали в діапазоні ΔK від $3,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ до $10 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, що відповідало середньоамплітудній ділянці кінетичної діаграми та зміні швидкості росту втомної тріщини від $5 \cdot 10^{-9}$ м/цикл до $8 \cdot 10^{-8}$ м/цикл.

Розвиток тріщини зазнає в результаті встановлення поляризації (катодних чи анодних потенціалів) значних змін (див. табл.). Вплив поляризації кількісно оцінювали відношенням $N = V_n / V_0$, де V_n – швидкість росту тріщини після вмикання поляризації, V_0 – вихідна швидкість росту тріщини. Дію електрохімічної поляризації вивчали в діапазоні ΔK від $3,0$ до $10 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, що відповідало середній ділянці кінетичної діаграми та зміні швидкості росту втомної тріщини від 5×10^{-9} до 8×10^{-8} м/цикл.

Катодна поляризація в діапазоні $E = -0,5 \dots -1,5$ В як пришвидшує, так і сповільнює ріст втомної тріщини залежно від величини потенціалу поляризації та розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень. Виявилось, що вплив катодної поляризації (1–3) на швидкість корозійного росту втомної тріщини залежить від рівня прикладеного навантаження.

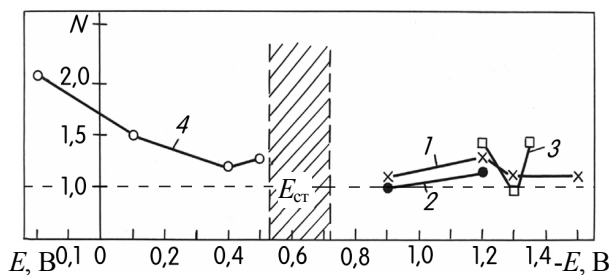
Таблиця. Вплив катодної (1–3) та анодної (4, 5) поляризацій на ріст втомної тріщини у титановому сплаві* ПТ-3В

Table. Influence of cathodic (1–3) and anodic (4, 5) polarizations on fatigue crack growth in titanium alloy* ПТ-3В

№ дослідю	ΔK , МПа $\sqrt{\text{м}}$	V_0 , м/цикл	E_{corr} , В	E_{pol} , В	V_n , м/цикл	$N=V_n/V_0$
1	4,44	1,96	-0,64	-0,9	0,94	0,48
				-1,0	1,61	0,82
				-1,1	1,34	0,68
				-1,2	1,17	0,60
				-1,3	0,95	0,48
				-1,4	1,07	0,55
2	6,19	11,7	-0,69	-0,9	12,5	1,07
				-1,3	13,0	1,11
				-1,5	13,3	1,14
3	9,02	58,3	-0,72	-0,9	58,3	1,00
				-1,2	66,7	1,14
4	6,33	10,4	-0,62	-0,5	13,5	1,30
				-0,4	12,5	1,20
				-0,1	15,6	1,50
				0,2	21,4	2,05
5	3,37	0,360	-0,51	-0,1	0,59	1,64
				0,2	0,42	1,17
				0,6	0,66	1,83

* Пластинчаста структура з дрібнодисперсною α -фазою. Середній розмір α -колоній ≈ 20 мкм, товщина α -пластин 1...2 мкм

Катодна поляризація в діапазоні $E = -0,5...-1,5$ В як пришвидшує, так і сповільнює ріст втомної тріщини залежно від величини потенціалу поляризації та розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK (рис. 4 і 5). При $\Delta K > 6$ МПа $\sqrt{м}$ діапазон катодних потенціалів $-0,9...-1,5$ В, практично всі значення $N \geq 1$, тобто ріст тріщини пришвидшується або залишається незмінним (див. рис. 4).

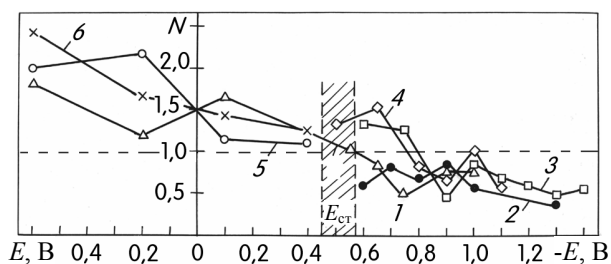


1 – $\Delta K = 6,2$ МПа $\sqrt{м}$; 2 – $\Delta K = 9,0$ МПа $\sqrt{м}$;
3 – $\Delta K = 9,3$ МПа $\sqrt{м}$; 4 – $\Delta K = 6,3$ МПа $\sqrt{м}$

Рис. 4. Вплив катодної (1–3) та анодної (4) поляризацій на швидкість росту втомної тріщини при $\Delta K > 6$ МПа $\sqrt{м}$

Fig. 4. The effect of cathodic (1–3) and anodic (4) polarization on the fatigue crack growth rate at $\Delta K > 6$ МПа $\sqrt{м}$

У діапазоні $\Delta K = 5...6$ МПа $\sqrt{м}$ катодна поляризація двояко впливає на швидкість росту втомної тріщини, залежно від величини потенціалу поляризації (див. рис. 5).



1 – $\Delta K = 3,4$ МПа $\sqrt{м}$; 2 – $\Delta K = 3,8$ МПа $\sqrt{м}$;
3 – $\Delta K = 4,4$ МПа $\sqrt{м}$; 4 – $\Delta K = 4,6$ МПа $\sqrt{м}$;
5 – $\Delta K = 4,0$ МПа $\sqrt{м}$; 6 – $\Delta K = 4,7$ МПа $\sqrt{м}$

Рис. 5. Вплив катодної (1–4) та анодної (5, 6) поляризацій на швидкість росту втомної тріщини при $\Delta K < 6$ МПа $\sqrt{м}$

Fig. 5. The effect of cathodic (1–4) and anodic (5, 6) polarization on the fatigue crack growth rate at $\Delta K < 6$ МПа $\sqrt{м}$

За малих значень перенапруги $\Delta E = 0,25$ В катодна поляризація активізує ріст тріщини. Подальше зміщення катодного потенціалу у від'ємну область значень знижує V_n порівняно з вихідною. Коли ΔK стає меншим за $4,5$ МПа $\sqrt{м}$, катодна поляризація сповільнює ($N < 1$) ріст втомної тріщини у всьому дослідженому інтервалі потенціалів (див. рис. 5). Необхідне зміщення потенціалу до захисного значення, за якого сповільнюється ріст втомної тріщини, становить при ΔK до $4,5$ МПа $\sqrt{м}$ – $0,25...0,29$ В від потенціалу корозії.

Таким чином, у водних розчинах аміаку зразки сплаву ПТ-3В можуть бути катодно захищені від корозійновтомного руйнування за поляризації $\Delta E > 0,25$ В, при цьому час до руйнування сплаву зростає удвічі.

Анодна поляризація (див. рис. 4, 5) у діапазоні потенціалів $-0,5...0,6$ В пришвидшує у дватри рази ріст корозійновтомної тріщини у припороговій та середньоамплітудній ділянках кінетичної діаграми втомного руйнування (див. рис. 4, 5), тобто незалежно від величини розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень. Струми анодної поляризації значно залежать від прикладеного навантаження (рис. 6).

Збільшення ΔK від 4 до 6 МПа $\sqrt{м}$ зумовлює суттєве зростання питомої густини струмів у дослідженому інтервалі потенціалів (у 3...10 разів симбатно з напружено-деформованим станом металу в околі вершини тріщини), що свідчить про значний вплив напруженого стану на анодні процеси у вершині тріщини. У разі малих навантажень хід вольт-амперної кривої повторює хід $i-E$ кривої, знятої без навантаження, а саме: простежується стабілізація анодного струму корозії у процесі вмикання поляризації з подальшим незначним його зростанням.

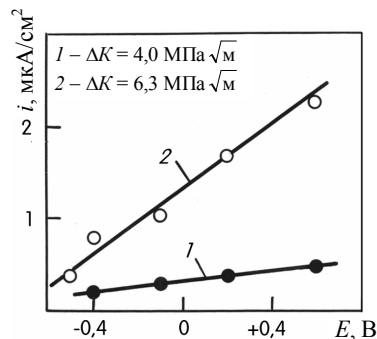
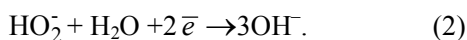
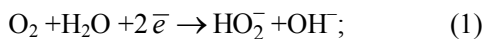


Рис. 6. Залежність густини струму анодної поляризації від величини ΔK

Fig. 6. Dependence of the anodic polarization current density on the value of ΔK

Це означає, що за цих умов швидкість росту тріщини є меншою за швидкість утворення захисної плівки. Зі збільшенням навантаження реакції анодного розчинення переважають над процесами репасивації, спричинюючи зростання густини струму. Зазначимо, що навіть короткочасне вмикання анодної поляризації зсуває стаціонарний електродний потенціал у від'ємну область.

Неоднозначний вплив катодної поляризації на швидкість росту тріщин, згідно з даними [1; 8], може бути інструментом з'ясування механізму корозійного розтріскування. Сповільнення росту тріщини пов'язують із механізмом локального анодного розчинення. А накладання від'ємного потенціалу стримує цей процес. Якщо катодна поляризація пришвидшує руйнування, то головним процесом під час корозійного розтріскування є водневе окрихчення. Проте [2] позитивний вплив катодної поляризації може бути також пов'язаний зі збільшенням репасивації внаслідок підвищення рН прикатодного шару в процесі поляризації. Реалізація цього механізму в наших умовах досить вірогідна, оскільки катодний процес на сплаві відбувається з кисневою деполізацією [13–15], яка перебігає в лужних розчинах згідно з реакцією



Отже, за малих значень ΔK , коли катодна поляризація сповільнює ріст тріщини, головним механізмом корозійновтомного руйнування є локальне анодне розчинення за умов почергового утворення та руйнування захисних плівок у вершині тріщини. Зі збільшенням амплітуди деформації сплаву, а відповідно й швидкості поширення тріщини процеси руйнування випереджають утворення захисної плівки, яка була бар'єром для проникнення водню. Враховуючи, що кислотність електроліту у вершині тріщини може досягати 1,7...3,0 рН [10], вірогідне припущення про зміну механізму руйнування з анодного розчинення на водневе окрихчення при $\Delta K > 6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, коли катодна поляризація пришвидшує ріст корозійновтомної тріщини.

Висновки

1. За умов плоскої деформації залежність стабілізованого значення електродного потенціалу $E_{\text{ст}}$ і логарифму розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень прямолінійна. Інші чинники (структура, концентрація розчину) впливають на цю залежність, підсилюючи або послаблюючи її.

2. Виявлено діапазон критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень $\Delta K = 4,5...6,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, перевищення якого зумовлює зміну механізму корозійно-циклічного росту тріщини. Локальне анодне розчинення, як головний механізм у випадку корозійної втоми, змінюється на водневе окрихчення, яке, якщо $\Delta K > 9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, пришвидшує ріст тріщин втоми.

3. Катодна поляризація за вихідних швидкостей росту тріщин до $2 \cdot 10^{-9} \text{ м/цикл}$ та $\Delta K \leq 4,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ сповільнює ріст тріщини удвічі. Необхідне зміщення потенціалу до захисного значення, за якого сповільнюється ріст втомної тріщини, становить при ΔK до $4,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} - 0,25...0,29 \text{ В}$ від потенціалу корозії. Анодна поляризація пришвидшує ріст тріщин у два-три рази незалежно від вихідних швидкостей поширення.

Бібліографічний список

1. Дмитрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. Львів: НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. 341 с.
2. Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Лещак Р. Л. Руйнування та міцність трубних сталей у водневмісних середовищах. Львів: Простір-М, 2020. 222 с.
3. Калахан О. С. Електрохімічні закономірності корозійно-механічного руйнування титанових сплавів. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2021. № 25. С. 113-119.
4. Калахан О. С. Кінетичні закономірності електрохімічних процесів корозійної втоми титанових сплавів. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2003. № 5. С. 14-27.
5. Калахан О. Електрохімія корозійновтомних процесів титанових сплавів. *Вісник Львівського університету. Сер. хім.* 2002. Вип. 42. С. 175-178.
6. Калахан О. С. Закономірності електрохімічних властивостей титанових сплавів під час корозійної втоми. *Сучасні проблеми механіки матеріалів: фізико-хімічні аспекти та діагностика властивостей*: Міжнар. наук.-техн. симп. (Львів, 4–7 черв. 2001 р.). Львів: Наук. т-во ім. Шевченка, 2001. С. 94-95.
7. Калахан О. С., Похмурський В. І. Корозія та корозійновтомний ріст тріщини у титановому псевдо- α сплаві у водно-аміачних розчинах. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2001. №5. С. 31-44.
8. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довід. посіб. / за заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів. Львів: Сполом, 2009. 504 с.
9. Похмурський В. І., Калахан О. С. Вплив поляризації на ріст втомних тріщин у титановому псевдо- α сплаві у лужному середовищі. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2001. Спец. вип. № 2. С. 51–55.

10. Створення сучасних методів технічної діагностики працездатності систем паро-водяного тракту енергоблоків ТЕС / І. М. Дмитрах, А. М. Сироток, Б. П. Русин, Ю. В. Лисак, А. Б. Вайнман. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин*: зб. наук. статей / наук. керівник Б. С. Патон. Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. С. 128-132.

11. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: довід. посіб.: у 8 т. / за заг. ред. З. Т. Назарчука. Т. 6: Електрохімічні методи моніторингу деградації матеріалу конструкцій. Львів: Простір-М, 2017. 302 с.

12. Encyclopedia of electrochemistry / ed. by A. G. Bardand, M. Stratmann. Vol. 4: Corrosion and Oxide Films. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. 542 p.

13. Kalakhan O. S. Kinetic regularities of the electrochemical processes of corrosion fatigue in titanium alloys. *Materials Science*. 2003. 39 (5). P. 615-628.

14 Kalakhan O. S., Pokhmurskii V. I. Corrosion and Corrosion Crack Resistance of the PT3V Titanium Alloy in Aqueous Solutions of Ammonia. *Materials Science*. 2001, Vol. 37, No 5. P. 718-734.

15. Pourbaix M. Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solution. New York: Pergamon Press, 1966. 1243 p.

Стаття надійшла 22.09.2022