

**Стечишин М.С.,
Терещенко В.П.**

Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна

**ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ
І КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНОГО РУЙНУВАННЯ
ХРОМОВАНИХ СТАЛЕЙ
В КОРОЗІЙНО-АКТИВНИХ
СЕРЕДОВИЩАХ-ЕЛЕКТРОЛІТАХ**

Постановка проблеми

У відповідності до гідродинамічної теорії поширення ударних хвиль, ударно-хвильові явища у великій мірі визначають при кавітаційно-ерозійному зношуванні інтенсивність і співвідношення пружної та пластичної деформації поверхневих шарів металу. Вплив середовища при цьому проявляється у зміні поверхневої енергії металу, що перешкоджає або полегшує розрядку дислокацій в приповерхневому шарі.

При випробовуваннях на кавітаційно-ерозійне зношування в дистильованій воді, кислих та лужних середовищах і в розчинах хлориду натрію встановлено циклічний характер руйнування поверхневих шарів [1], а також показано, що зносостійкість матеріалів при кавітації пропорційна енергоємності поверхневих шарів, що визначаються енергією, яка витрачається на деформування і тріщиноутворення матеріалу. Відомо [2, 3], що деформування і руйнування матеріалів при одночасній дії середовища проходить при значно менших механічних напруженнях, ніж без середовища. Також встановлено [4], що корозійно-активні середовища сприяють виходу дислокацій на поверхню, викликають зменшення енергоємності поверхневих шарів металу, які визначають їх зносостійкість при мікроударному навантаженні. У роботі [4] наведені основні вихідні рівняння кавітаційно-ерозійного зношування металів, що виходять з положень структурно-енергетичної теорії кавітаційного руйнування поверхонь, яка розвинута в роботах П.І. Погодаєва [5] та О.І. Некоза [6]. Однак у наведених рівняннях недооцінюється вплив корозійного чинника руйнування, що вносить великі похибки при визначенні кавітаційної стійкості поверхонь металів на основі лабораторних досліджень порівняно з їх зносостійкістю знайденою в реальних умовах експлуатації деталей. Тому актуальним є завдання розробки таких методів лабораторних випробувань, результати яких можна було б з найменшою похибкою перенести для оцінки кавітаційно-ерозійної стійкості деталей обладнання в реальних умовах їх експлуатації.

Одним з перспективних напрямів у цьому плані є досягнення рівності співвідношення механічного і корозійного чинників руйнувань при лабораторних дослідженнях і в умовах експлуатації [7]. При цьому основна проблема полягає в точності оцінки частки корозійних втрат у процесі кавітації, що визначається методикою її знаходження. Так, за оцінкою різних авторів, які застосовували різні методики оцінки корозійних втрат [6 - 10], вони сягають від 1 ... 5 % до 60 ... 65 %. Очевидно, що таке розходження оцінок корозійного чинника руйнування потребує розробки нових методів і способів проведення випробувань, а також дослідження механізмів впливу корозійного чинника руйнування на загальну кавітаційно-ерозійну зносостійкість металів в корозійно-активних середовищах. Саме цій меті підпорядкована вказана робота.

Методика, матеріали та середовища для проведення досліджень

Дослідження закономірностей кавітаційно-ерозійного зношування матеріалів, а також електрохімічні вимірювання проводили на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ) на базі генератора ультразвукових коливань УЗДН-1, укомплектованого ємністю для робочих середовищ, потенціостатом П5827-М, термометром ТМ-14, універсальним рН-метром АІ-123, системою охолодження робочого середовища [4, 7, 11].

Кількісну оцінку корозійного чинника руйнування проводили шляхом екстраполяції тафелєвських ділянок поляризаційних кривих з наступним знаходженням струмів корозії, а вже за їх величиною, за законом Фарадея, знаходили корозійні втрати маси. Поляризаційні криві отримували в статичі та в процесі кавітації, а відтак і корозійні втрати маси знаходили безпосередньо в процесі кавітаційного руйнування поверхні в заданому середовищі. Струми корозії визначали за допомогою комп'ютерного аналізу поляризаційних кривих [12].

Дослідження проводили в модельних середовищах харчових виробництв, а саме: кислому – 2 %-вий розчин лимонної кислоти ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$); нейтральному 3 %-вий розчин хлориду натрію і лужному – 25 %-вий розчин оксиду кальцію (CaO) з додаванням 15 % цукрози ($C_{12}H_{22}O_{11}$).

Кавітаційно-ерозійні випробування та електрохімічні вимірювання проводили на конструкційних сталях 45 і 40Х для отримання порівняльних даних, а також на легованих нержавіючих сталях з різним вмістом хрому: Х12, 40Х13, 25Х13Н2, 95Х18, 08Х18Н9Т.

Відомо, що хромисті нержавіючі сталі залежно від вмісту вуглецю можуть відноситись до різних структурних класів. Так сталь X12 відноситься до ледебуритного класу (містить (%), як показав аналіз¹, С 2.1, Cr 11.7, Si 0.3, Mn 0.40, S 0.03, P 0.03), сталь 40X13 до мартенситного класу (С 0.39, Cr 13, Si 0.5, Mn 0.4, S 0.025, P 0.03), сталь 25X13Н2 до мартенсито-феритного класу (С 0.27, Cr 13, Ni 1.8, Si 0.3, Mn 0.8, S 0.22, P 0.1), сталь 95X18 до феритного класу (С 0.92, Cr 18.5, Si 0.8, Mn 0.6, S 0.025, P 0.03). Ці сталі є найбільш дешевими і поширеними нержавіючими сталями, їх використовують в побуті та техніці (лопати гідротурбін і парових турбін). Крім цього, вони мають підвищену пластичність і опір ударним навантаженням, що є важливим при мікроударних навантаженнях [13].

Нержавіюча сталь 08X18Н9Т відноситься до аустенітного класу (С 0.07, Cr 17.9, Ni 9.7, Mn 1.8, Ti 0.7, Si 0.7, S 0.02, P 0.03) і має високий опір міжкристалітній корозії [14]. У результаті термічної обробки при нагріванні до 1000...1050 °С і швидкого охолодження на повітрі або у воді сталь має однорідну структуру твердого розчину аустеніту, що поєднує добру пластичність і високу корозійну стійкість. Вона широко застосовується в харчовому машинобудуванні і її часто називають „харчова нержавійка”.

Основні результати досліджень

Оскільки електродний потенціал характеризує термодинамічний стан системи метал-середовище, а кінетика його зміни вказує на швидкість пристосування поверхневих шарів металу до електрохімічних параметрів середовища, то і знімали характеристики зміни потенціалу поверхні від часу контакту з середовищем ($\Phi - \tau$) в статичні та при мікроударному навантаженні в кислому (рис. 1), нейтральному і лужному середовищах.

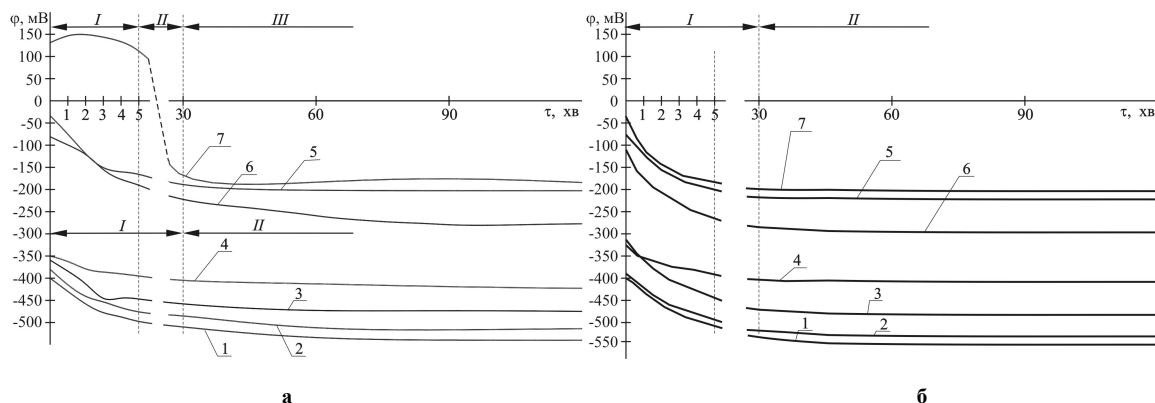


Рис. 1 - Кінетика зміни електродного потенціалу поверхонь матеріалів в кислому середовищі:
а – в статичних умовах; б – при мікроударному навантаженні
1 – сталь 45; 2 – 40X; 3 – X12; 4 – 40X13; 5 – 25X13H2; 6 – 95X18; 7 – 08X18H9Т

Аналіз кінетики зміни потенціалу металів в статичні в кислому середовищі (рис. 1, а) показує, що на початку контакту сталі 08X18Н9Т з середовищем величина потенціалу $\Phi_n = +132$ мВ, а після 30 хв взаємодії з середовищем встановлене значення потенціалу $\Phi_{вст} = -168$ мВ. Тобто на відріжку часу в межах від 5 до 30 хв знак потенціалу змінюється з додатнього на від'ємний. Криву $\Phi - \tau$, в цьому випадку, можна поділити на три ділянки. На ділянці I (від 0 до 5 хв) має місце плавне зниження потенціалу, а на ділянці II (від 5 до 30 хв) проходить його різке зниження до від'ємних значень і на ділянці III (від 30 до 120 хв) потенціал стабілізується $\Phi_{вст}$. Плавне зниження потенціалу на ділянці I, очевидно, свідчить про руйнування нестійких поверхневих окислених плівок, а різке зниження потенціалу на ділянці II - про їх руйнування і встановлення електрохімічної рівноваги системи поверхня-середовище на ділянці III, яка контролюється величиною встановленого потенціалу $\Phi_{вст} = -168$ мВ. Для інших сталей в статичні характерна наявність двох ділянок швидкості зміни потенціалу I і II. На ділянці I, залежно від марки сталі, з різною швидкістю потенціал змінюється в сторону від'ємних значень на протязі від початку випробувань до 30 хв, а далі набуває встановленого значення $\Phi_{вст}$. Величина встановленого потенціалу визначається вмістом хрому і вуглецю, а також співвідношенням між ними. У загальному випадку зі збільшенням вмісту хрому і зменшенням вмісту вуглецю Φ_n і $\Phi_{вст}$ набувають більшого додатнього („благород-

¹ Дослідження проводились на квантометрі ДФС-51 в лабораторії ХЗТП

ного») значення, що особливо видно на прикладі кривої $\Phi - \tau$ для сталі 08X18H9T (рис.1, а).

В умовах мікроударного навантаження в кислому середовищі (рис.1, б), характер зміни кривих $\Phi - \tau$ має більш плавний вигляд, а початкові потенціали для усіх сталей мають від'ємне значення при незмінному порядку розміщення кривих (рис.1, а, б) у порівнянні зі статикою. На цих кривих, на відміну від кривих знятих в статистиці, можна виділити дві ділянки (I, II). Ділянка I характеризується зниженням від'ємного потенціалу, а швидкість зниження і особливо час досягнення встановленого потенціалу $\Phi_{вст}$ суттєво залежать від вмісту хрому і вуглецю та співвідношення між ними. Відсутність ділянки з додатним значенням потенціалу при кавітації в кислому середовищі підтверджує неефективність захисних поверхневих плівок і їх слабе зчеплення з основним металом на сталі 08X18H9T (рис.1, б). Очевидно, що з початком кавітаційного навантаження вони руйнуються і електрохімічний контакт відбувається з основним металом. Так, початковий потенціал для сталі 08X18H9T в статистиці $\Phi_n = +132$ мВ, при кавітації $\Phi_n = -40$ мВ, а встановлений потенціал $\Phi_{вст} = -168$ мВ і -207 мВ, відповідно. На ділянці II при кавітації маємо чітко виражену стабілізацію потенціалу в часі, тобто досягнення ним встановленого значення ($\Phi_{вст}$). Аналогічний характер мають криві зміни потенціалу $\Phi - \tau$ в нейтральному та лужному середовищах. Таким чином, за часом досягнення встановленого значення потенціалу та за зростанням від'ємної величини встановленого потенціалу досліджені сталі в усіх середовищах розміщуються в ряд: 08X18H9T, 25X13H2, 95X18, 40X13, X12, 40X і сталь 45.

Згідно з даними багатьох робіт [4, 6, 15], за характером зміни поляризаційних кривих (ПК) матеріалів можна, в першому наближенні, судити про їх кавітаційно-ерозійну зносостійкість. Поляризаційні криві знімали для зазначених сталей у статистиці і при кавітації.

Аналіз характеру зміни ПК в анодній і катодній зонах поляризації в статичних умовах і при кавітації показав, що при кавітації поряд із зміщенням встановленого потенціалу у від'ємну сторону, анодні і катодні криві ідуть крутіше до осі абсцис, тобто кут їх нахилу до осі абсцис більший (рис. 2, а, б, в). Останнє є свідченням того, що швидкість зміни струму поляризації при зміні потенціалу поляризації збільшується. Крім того, важливою характеристикою корозійної і кавітаційної стійкості є наявність або відсутність зони пасивації в статистиці (характеристика корозійної стійкості) і при кавітації (показник кавітаційної стійкості в даному середовищі). Важливе значення має також протяжність цієї зони, з її збільшенням корозійна та кавітаційна стійкість підвищується.

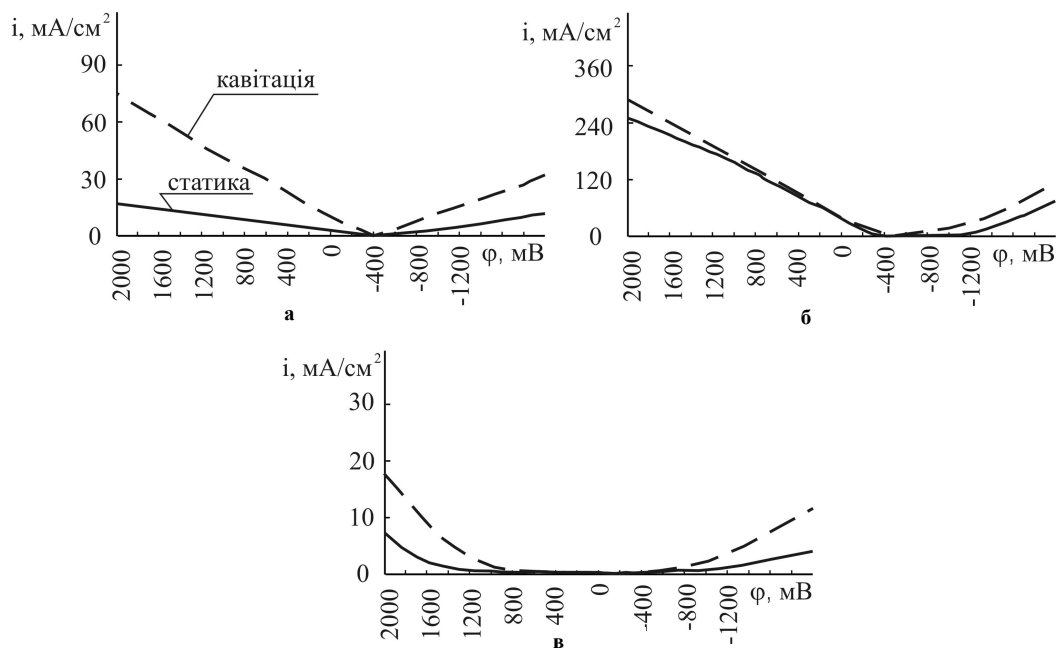


Рис. 2 – Поляризаційні криві матеріалів:
а – сталь 45 у кислому середовищі; б – сталь 40X у нейтральному середовищі;
в – сталь 08X18H9T у лужному середовищі

За характером зміни ПК, наявністю або відсутністю зон пасивації, їх протяжністю, досліджені матеріали, залежно від виду середовища, можна розділити на три групи (рис. 2).

До першої групи відносять сталі, для яких на знятих навіть в статистиці ПК не має ділянок пасивації (рис. 2, а). До цієї групи відносяться вуглецева сталь 45 в усіх досліджених середовищах, сталь 40X в

кислому і лужному та сталь Х12 в кислому середовищах. Для цих сталей, особливо при кавітації, характерна майже прямолінійна залежність між струмом поляризації та потенціалом і значна динаміка поляризаційних процесів. Останнє, дає можливість констатувати недостатню корозійну стійкість цих сталей у зазначених середовищах та прогнозувати їх низьку кавітаційно-ерозійну зносостійкість у цих середовищах.

До другої групи можна віднести сталь 40Х в нейтральному розчині хлориду натрію (рис. 2, б), сталь Х12 в нейтральному і лужному середовищах. ПК цих сталей мають ділянку пасивації, особливо в статистиці, але її протяжність порівняно невелика і відповідає незначним перенапруженням потенціалу.

До третьої групи відносяться решта сталей, а особливо сталь 08Х18Н9Т в усіх досліджених середовищах (рис. 2, в). Для третьої групи характерна наявність зони пасивації і в статистиці, і в динаміці (при кавітації), яка має, порівняно з другою групою, значно ширші межі, а також малу швидкість зміни струму поляризації при зміні потенціалу поляризації.

Для перевірки результатів електрохімічних вимірювань, методики їх проведення та можливості використання для попередньої оцінки кавітаційно-ерозійної зносостійкості матеріалів в заданому середовищі за величиною струму корозії знаходили втрати маси від корозії в статистиці та при кавітації (табл. 1).

Таблиця 1

Втрати від корозії в статистиці $\Delta G_{кор}^{ст}$ та при кавітації $\Delta G_{кор}^{МН}$

(амплітуда коливань вібратора $a = 36$ мкм, частота коливань $f = 22$ кГц)

Матеріал	Група за характером зміни ПК	Втрати маси в середовищі, мг/см ²								
		Нейтральне			Кисле			Лужне		
		$\Delta G_{кор}^{ст}$	$\Delta G_{кор}^{МН}$	$\epsilon, \%$	$\Delta G_{кор}^{ст}$	$\Delta G_{кор}^{МН}$	$\epsilon, \%$	$\Delta G_{кор}^{ст}$	$\Delta G_{кор}^{МН}$	$\epsilon, \%$
Сталь 45	1	0,0185	0,740	2,5	0,0273	0,421	6,5	0,0374	0,6929	5,4
Сталь 40Х		-	-	-	0,0199	0,285	7,0	0,0094	0,1907	4,9
Х12		-	-	-	0,0142	0,2119	6,7	-	-	-
Сталь 40Х	2	0,0123	0,610	2,0	-	-	-	-	-	-
Х12		0,00259	0,111	2,3	-	-	-	0,0201	0,448	4,5
40Х13	3	0,00103	0,038	2,7	0,000359	0,000441	81,4	0,000375	0,000438	85,6
08Х18Н9Т		0,000534	0,019	2,8	0,00018	0,000228	78,9	0,000123	0,000148	83,1

Примітка: $\epsilon = \frac{\Delta G_{кор}^{ст}}{\Delta G_{кор}^{МН}} 100\%$ – доля корозійних втрат.

Аналіз отриманих результатів показав (табл. 1), що в нейтральному середовищі втрати від корозії у статистиці $\Delta G_{кор}^{ст}$ для сталей зменшуються із збільшенням у них вмісту хрому. Для сталей 45 і 40Х ця величина одного порядку, при переході до сталі Х12 корозійна стійкість значно підвищується, а для нержавіючих сталей 40Х13 і 08Х18Н9Т вона у 18 і 34 рази вища від корозійної стійкості сталі 45. Аналогічно відбувається зміна корозійної стійкості розглянутих сталей при їх мікроударному навантаженні (кавітації). Разом з тим, для всіх трьох груп сталей у нейтральному середовищі доля корозійних втрат в статистиці становить лише 2 ... 2,8 % від корозійних втрат при кавітації, величина яких зростає при цьому більше як в 35 ... 40 разів.

У кислому та лужному середовищах для сталей 1 і 2 груп спостерігається деяке підвищення доли корозійних втрат в статистиці порівняно з кавітацією, що складає 4,5 ... 5,4 % в лужному та 6,5 ... 7 % в кислому середовищах.

Для сталей 40Х13 і 08Х18Н9Т (сталі третьої групи за характером зміни ПК) в кислому та лужному середовищах електрохімічна поведінка різко відмінна, порівняно з вище розглянутими сталями. Для них втрати від корозії в статистиці становлять більше 80 % від корозійних втрат при кавітації. Тобто при кавітації корозійні втрати збільшуються в середньому в 1,2 рази. Останнє є яскравим свідченням того, що нержавіючі сталі набагато більше ефективні для виготовлення корозійно та кавітаційно-стійких деталей обладнання, що контактують з кислими і лужними середовищами аніж з 3 %-вим розчином хлориду натрію.

Аномальна поведінка нержавіючих сталей з підвищеним вмістом хрому ($Cr \geq 13\%$) під напруженням у розчинах хлориду натрію розглянута в багатьох роботах. Так, в роботі [16] виявлено, що в інкубаційному періоді корозії під напруженнями сталі типу Х18Н10Т проходить накопичення іонів хлору за рахунок їх абсорбції пасивною плівкою, а далі відбувається її пробій в місцях виходу площин ковзання дислокацій. На стадії розвитку мікротріщини при анодному процесі селективно розчиняється нікель в її вершині і проходить фазове перетворення γ - в α -фазу в мікрозонах збіднення матриці нікелем. Наступне

наводнювання α -фази в вершині тріщини приводить до її крихкого руйнування під навантаженням. Експериментальними дослідженнями встановлено, що після корозійно-механічних випробувань в розчинах хлориду натрію концентрація водню у вершині тріщини збільшується в 25 ... 27 разів [17], а водневий показник знижується з pH 8 до pH 2,3 [18]. При кавітаційному навантаженні описані процеси проходять значно інтенсивніше порівняно з корозією під напруженням, що і приводить до інтенсивного руйнування нержавіючих аустенітних сталей типу 08X18H9T в розчинах хлориду натрію. Такий висновок підтверджується результатами кавітаційних випробувань в нейтральних, кислих та лужних середовищах (табл. 2).

Аналіз отриманих даних також підтверджує висновки про можливість прогнозування кавітаційно-ерозійної стійкості металів за результатами електрохімічних вимірювань: за величиною зміщення потенціалу в сторону від'ємних значень і швидкістю його стабілізації в часі при кавітації і, особливо, за характером зміни поляризаційних кривих при їх кавітаційному зношуванні в середовищі. Підтверджується також висновок про нетипову поведінку нержавіючих сталей в 3 %-му розчині хлориду натрію при їх мікроударному навантаженні. Так, для усіх сталей, корозійні і кавітаційні втрати в 3 %-му розчині хлориду натрію найвищі і в порядку їх зниження, залежно від середовища, сталі розміщені в ряд: нейтральне, кисле і лужне середовище. Зі збільшенням вмісту хрому в сталі кавітаційна зносостійкість зростає. У порівнянні зі сталлю 45 втрати маси при кавітації 08X18H9T зменшуються приблизно в три рази в усіх середовищах. При цьому різко зменшується частка корозійного вкладу в загальні втрати маси при кавітації: від 2 до 4 %, залежно від виду середовища, для сталі 45 і до 0,3 % для нержавіючих сталей в 3 %-му розчині хлориду натрію та близько 0,003 % в кислих і лужних середовищах. Тим не менше, не дивлячись на незначні втрати маси, корозійні процеси мають визначальний вплив на інтенсивність кавітаційного руйнування металевих сплавів. Корозійні язви, пітінги тощо сприяють виходу дислокацій на поверхню, зменшують енергоємність поверхневих шарів металу, є центрами зародження мікротріщин і наступного втомного руйнування поверхонь при їх мікроударному навантаженні в корозійно-активних середовищах. Корозія, таким чином, є каталізатором процесу кавітаційного руйнування металевих поверхонь.

Таблиця 2

Корозійні $\Delta G_{кор}^{ст}$ і загальні втрати маси ΔG^{MH} при кавітації, мг/см²

Матеріал	Середовище								
	Нейтральне			Кисле			Лужне		
	$\Delta G_{кор}^{MH}$	ΔG^{MH}	$\frac{\Delta G_{кор}^{MH}}{\Delta G^{MH}} \cdot 100\%$	$\Delta G_{кор}^{MH}$	ΔG^{MH}	$\frac{\Delta G_{кор}^{MH}}{\Delta G^{MH}} \cdot 100\%$	$\Delta G_{кор}^{MH}$	ΔG^{MH}	$\frac{\Delta G_{кор}^{MH}}{\Delta G^{MH}} \cdot 100\%$
Сталь 45	0,740	18,54	4,00	0,421	17,15	2,46	0,6926	14,60	4,74
40X	0,610	18,00	3,39	0,285	18,05	1,58	0,1907	14,45	1,32
X12	0,111	15,15	0,73	0,2119	13,10	1,69	0,448	11,45	3,91
40X13	0,038	13,25	0,29	0,000441	9,25	0,0047	0,00037	9,15	0,1041
98X18	0,032	10,45	0,31	0,000406	7,75	0,0052	0,00029	7,35	0,004
25X13H2	0,027	9,80	0,28	0,000302	7,55	0,004	0,00026	7,05	0,0037
08X18H9T	0,019	6,15	0,30	0,000228	5,95	0,0038	0,00014	4,90	0,0028

Незважаючи на те, що нержавіюча сталь 08X18H9T має високу корозійну стійкість в статистиці і незначні корозійні та загальні втрати при кавітації (табл. 2) її, як показали випробування, не варто застосовувати в умовах мікроударного навантаження в розчинах хлориду натрію.

За розрахунками різних авторів, температури детонуючих кавітаційних бульбашок становлять приблизно 500 ... 700 °C і можуть досягати 1000 ... 3000 °C. При таких локальних спалахах температури в мікрооб'ємах металу проходить розчинення вуглецю (карбідів) і утворюється перенасичений твердий розчин, що при охолодженні викликає виділення карбідів. Виділення карбідів, переважно типу $M_{23}C_6$, проходить по границях зерен, що при певних умовах приводить до окрихчування сталі і до появи міжкристалітної корозії [19].

На можливість міжкристалітної корозії вказують також і проведені нами електрохімічні дослідження. Зокрема характер зміни потенціалу сталі 08X18H9T (рис. 1), при якому відбувається зміна потенціалу з додатнього на від'ємний, що свідчить про „розблагородження” потенціалу і про можливість проходження міжкристалітної корозії. Міжкристалітна корозія проходить поетапно: а) збіднення границь хромом; б) розчинення на границях зерен залишкових фаз; в) збільшення внутрішніх напружень пов'язаних з виділенням цих фаз [20]. При кавітації усі ці процеси значно інтенсифікуються і руйнування починається на ослаблених границях між зернами аустеніту, які при подальшому руйнуванні границь є відособленими і „вимиваються” наступними ударними відбивними кавітаційними хвилями.

Висновки

1. Розроблено і апробовано методику знаходження корозійного чинника руйнування в процесі корозійно-механічного зношування металів у середовищах-електролітах.
2. Встановлено, що за характером зміни потенціалу і поляризаційних кривих металів у середовищі можна прогнозувати їх кавітаційно-ерозійну зносостійкість у цьому середовищі.
3. Знайдені електрохімічні параметри сталей з різним вмістом хрому (встановлені потенціали, струми корозії, корозійні втрати) в статичі і при кавітації в нейтральних, кислих і лужних середовищах.
4. Виявлена можливість і проаналізовані причини протікання процесів міжкристалітної корозії при кавітації нержавіючих сталей типу 08X18H9T в 3 %-му розчині хлориду натрію.

Література

1. Стечишин М.С. Закономерности кавитационно-эрозионного изнашивания металлов в коррозионных средах / М.С. Стечишин, А.И. Некоз, Л.И. Погодаев, А.С. Протопопов // Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – № 3. – С. 454-463.
2. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г.В. Карпенко. - К. : Наукова думка, 1976. - 125 с.
3. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. - М. : Металлургия, 1981. - 271 с.
4. Стечишин М.С. Анализ и исследование кавитационно-эрозионного изнашивания металлов в коррозионно-активных средах: сообщение 1 / М.С. Стечишин // Проблемы трибологии. - 1997. - № 1. - С. 87-93.
5. Погодаев Л.И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л.И. Погодаев, П.А. Шевченко. -Л.: Судостроение, 1984. – 264 с.
6. Некоз А.И. Разработка методов оценки и повышения долговечности деталей оборудования пищевой промышленности, подверженных кавитационно-эрозионному изнашиванию : автореф дис. на соискание науч. степени доктора техн. наук. 05.02.14 / А.И. Некоз ; Киевский ордена трудового красного знамени технологический институт пищевой промышленности. – К., 1985. – 43 с.
7. Стечишин М.С. Ускоренный метод оценки относительной износостойкости материалов при кавитационной эрозии / М.С. Стечишин // Проблемы трибологии. - 1997. - № 1. - С. 79-86.
8. Тимербулатов М. Г. Влияние коррозии на кавитационную стойкость металлов / М.Г Тимербулатов // Защита металлов. – 1972. – Т.8. – № 5. – С. 583-587.
9. Карасюк Ю.А. О соотношении коррозионного и эрозионного факторов в кавитационном разрушении металлов / Ю.А. Карасюк, В.И. Кочеров, В.В. Бенино и др. // Физ.-хим. механика материалов. - 1976. - № 5. - С. 14-16.
10. Георгиевская Е.К. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е.К. Георгиевская. - Л. : Судостроение, 1978. - 206 с.
11. Стечишин М.С. Методи оцінки та прогнозування довговічності при корозійно-механічному руйнуванні / М.С. Стечишин // Вісник ТУП. - 2001. - № 3. - С. 61-69.
12. Стечишин М.С. Комп'ютерний аналіз поляризаційних кривих / М.С. Стечишин, В.П. Терещенко, О.Ю. Рудик, В.Г. Войтков // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Збірник наукових праць. – Хмельницький, ТУП. – 2001. – С. 72-74.
13. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Справочник в пяти томах. Том 3. Специальные стали и сплавы ; под общ. ред. И.В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1968. – 446 с.
14. Томашов Н.Д. Механизм межкристаллитной коррозии нержавеющей сталей / Н.Д. Томашов, Г.П. Чернова, О.Н. Маркова // Прикладная химия. – 1970. - № 33. – С. 1324-1331.
15. Терещенко В.П. Кавітаційно-ерозійна стійкість матеріалів з різним вмістом хрому / В.П. Терещенко, М.С. Стечишин // Проблеми трибології. – 2006. – № 1. – С. 131-134.
16. Назаров А.А. Механизм коррозии под напряжением стали типа X18H10T в растворах хлорида / А.А. Назаров // Защита металлов. -1982. – Т.ХVII. - № 2. – С. 21-215.
17. Дмитрах И.Н. Определение циклической трещиностойкости конструкционных материалов в коррозионной среде с учетом электрохимических условий в вершине трещины : автореф дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук. 05.17.14 / И.Н. Дмитрах ; Фізико-Механічний Інститут ім. Карпенка. – Львов, 1982. – 27 с.
18. Дикий И.И. О роли водорода в процессе коррозионного растрескивания сталей в растворах хлоридов / И.И. Дикий, И.М. Процив, В.Г. Костюченко // Защита металлов. – 1983. – Т.ХIХ. - № 2. – С. 267-270.
19. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. М.: Металлургия, 1977. - 647 с.
20. Косый Г.Г. Об электрохимическом механизме межкристаллитной коррозии нержавеющей сталей и методах ее определения / Г.Г. Косый, В.С. Козуб // Защита металлов. – 1985. – Т. 1. - № 1. – С. 42-47.