

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 537.622.3:620.193.4:669.15

- Джус А. В. асистент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: anna-92@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6474-0732
- Нарівський О. Е. д-р техн. наук, технічний директор ТОВ «Укрспецмаш», м. Бердянськ, Україна, e-mail: amz309@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5608-1474
- Беліков С. Б. д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: belikov@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Субботін С. О. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: subbotin.csit@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5814-8268
- Пуліна Т. В. д-р економ. наук, професор, завідувачка кафедри менеджменту Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: pulinatv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2672-8281
- Леоценко С. Д. асистент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: sedrikleo@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5099-5518

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІТИНГОТРИВКОСТІ ТЕПЛООБМІННИКІВ ЗІ СПЛАВУ 06ХН28МДТ В ОБОРОТНИХ ВОДАХ

Мета роботи. Полягає у розробці математичних моделей, які описують залежності критичних температур пітингування (КТП) сплаву 06ХН28МДТ (аналог сталі AISI904L) у модельних оборотних водах з рН 4...8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л.

Методи дослідження. Розроблені математичні моделі ґрунтуються на багатомірних лінійних регресіях першого порядку та багатомірних квадратичних регресіях з поєднанням ознак.

Отримані результати. За результатами аналізу розробленої математичної моделі, хімічного складу, структурної гетерогенності досліджуваних плавок сплаву та параметрів модельних оборотних вод (рН і концентрація хлоридів) встановлено, що значимими змінними моделі є параметри середовища, середній діаметр зерна аустеніту сплаву 06ХН28МДТ та вміст у ньому хрому в межах стандарту на його виробництво. Оскільки показано, що КТП сплаву 06ХН28МДТ зростає на 8,3°C зі зниженням концентрації хлоридів у модельних оборотних водах від 600 до 350 мг/л, на 6,8°C зі збільшенням їх рН від 4 до 8, на 5,9 °C зі зменшенням середнього діаметру зерна аустеніту від 31 до 11 мкм та на 4,7°C зі зменшенням вмісту хрому від 24,31 до 21,84 мас. %, виявлено, що за таких самих умов досліджень параметри модельних оборотних вод найсуттєвіше впливають на КТП сплаву 06ХН28МДТ.

Наукова новизна. На підставі встановлених залежностей між критичними температурами пітингування сплаву 06ХН28МДТ його хімічним складом у межах стандарту та структурною гетерогенністю розроблено механізми їх впливу на пітинготривкість цього конструктивного матеріалу в оборотних промислових водах. Встановлено, що розміри включень нітридів та оксисульфідів титану в сплаві не впливають на вірогідність зародження і росту в їх околі стабільних пітингів у хлоридовмісних середовищах..

Практична цінність. Розроблені математичні моделі запропоновано застосовувати до вибору найтривкіших до пітингування в оборотних промислових водах плавок сплаву 06ХН28МДТ та прогнозування їхнього пітингування при експлуатації теплообмінників.

Ключові слова: сталь 06ХН28МДТ, AISI904L, КТП, критична температура пітингування, пітингова корозія, теплообмінник, оборотні води.

Вступ

Виробництво біопалива багатьма країнами розглядається як стратегія розвитку їх енергетичного комплексу. Зокрема, в Індії виробництво біопалива просувається як стратегія розвитку їх сільськогосподарських регіонів. Україна є світовим лідером з виробництва сільськогосподарської продукції та має достатню сировинну базу для виробництва біопалива. Вважають [1], що виробництво біопалива сприятиме зниженню викидів CO в атмосферу. У процесі виробництва такого палива використовують теплообмінне обладнання, зроблене з корозійноотривких сталей AISI 304, AISI321, AISI316, які можуть піддаватися локальній корозії в процесі нейтралізації каталізаторів хлорною кислотою [2], або пітингової корозії з боку оборотної води [3-6]. На бразильських заводах, що виробляють біопаливо, корозійноотривкі сталі AISI 304, AISI321, AISI316, які застосовували у виробництві обладнання, замінили на корозійноотривку сталь AISI 904L, оскільки проблеми локальної корозії під час зберігання, транспортування, виробництва та утилізації біодизелю, сприяли зупинкам технологічних процесів та призводили до великих збитків [7]. Проблеми локальної корозії теплообмінників з боку технологічного продукту вирішували в праці [2], а з боку оборотної води в працях [8-10]. Автори праць [8, 9] оцінювали пітинготривкість сплаву 06ХН28МДТ (аналог сталі AISI 904L) електрохімічними та гравіметричними методами, які не дають можливість прогнозувати тривкість сталей і сплавів до їх пітингування за конкретних умов експлуатації теплообмінників (температура, концентрація хлоридів та pH оборотних вод). У праці [11] пітинготривкість сплаву 06ХН28МДТ оцінювали за критичною температурою його пітингування в модельних оборотних водах, застосовуючи встановлені прямопропорційні регресійні залежності між критичною температурою пітингування (КТП) сплаву та складовими його хімічного складу і структури. Однак такий підхід має дискретний характер і потребує апроксимації отриманих результатів.

Мета роботи

Для встановлення впливу хімічного складу у межах стандарту і структурної гетерогенності сплаву 06ХН28МДТ на його пітинготривкість в оборотних промислових водах та її прогнозування, було побудо-

вано математичні моделі, що ґрунтуються на багатомірних лінійних регресіях першого порядку та багатомірних квадратичних регресіях з поєднанням ознак.

Матеріал і методика досліджень

Досліджували п'ять промислових плавок сплаву 06ХН28МДТ. Їх критичну температуру пітингування, хімічний склад (табл. 1), структурну гетерогенність, визначали в працях [8-11]. За основу побудови математичної моделі використовували багатомірну лінійну регресію [12].

Рівняння багатомірної лінійної регресії першого порядку має такий вигляд:

$$y^s = \sum_{j=1}^N w_j x_j^s, \quad s = 1, 2, \dots, S, \quad (1)$$

де y^s – значення вихідної ознаки для s -го спостереження вибірки (КТП) (залежні змінні), °С,

w_j – вага j -ї ознаки,

x_j^s – значення j -ї ознаки s -го екземпляра вибірки (незалежні змінні), зокрема x_1 – pH оборотної води (4...8); x_2 – вміст хлоридів у ній (350, 400, 500, 550, 600 мг/л); x_3 – вміст вуглецю (C), мас. %; x_4 – вміст марганцю (Mn) у сплаві, мас. %; x_5 – вміст кремнію (Si) у сплаві, мас. %; x_6 – вміст хрому (Cr) у сплаві, мас. %; x_7 – вміст нікелю (Ni) у сплаві, мас. %; x_8 – вміст титану (Ti) у сплаві, мас. %; x_9 – вміст сірки (S) у сплаві, мас. %; x_{10} – вміст фосфору (P) у сплаві, мас. %; x_{11} – вміст молібдену (Mo) у сплаві, мас. %; x_{12} – вміст міді (Cu) в сплаві мас. % (табл. 1); x_{13} – об'єм нітридів (V_n) (0,0931...0,1918, vol. %); x_{14} – об'єм сульфідів та окисульфідів ($V_{окс.}$), (0,0031...0,0091, vol. %); x_{15} – d_3 , мкм, середній діаметр зерна аустеніту (див. рис. 1); S – кількість екземплярів вибірки.

Щоб оцінити якість моделі (1), використовували суму квадратів миттєвих похибок (2) [12]:

$$E = \sum_{s=1}^S (y^s - y^{s*})^2,$$

де y^s – фактичне значення вихідної ознаки для s -го спостереження навчальної вибірки; y^{s*} – розрахункове значення вихідної ознаки для s -го спостереження навчальної вибірки. Для визначення коефіцієнтів лінійних регресійних моделей застосовували метод найменших квадратів [12].

Таблиця 1 – Хімічний склад сплаву 06ХН28МДТ (аналог сталі AISI 904L)

Номер плавки	Вміст легувальних елементів, мас. %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	S	P
1	0,050	0,60	0,32	24,31	27,39	2,90	2,75	0,79	0,006	0,029
2	0,067	0,57	0,46	22,68	27,65	2,78	2,68	0,59	0,005	0,027
3	0,068	0,55	0,54	21,84	27,45	2,55	2,60	0,55	0,004	0,038
4	0,048	0,62	0,57	22,67	27,73	2,56	2,53	0,67	0,006	0,028
5	0,050	0,57	0,31	23,46	27,51	2,51	2,78	0,89	0,004	0,032

Результати досліджень

Аналіз встановлених коефіцієнтів парної кореляції вхідних ознак x_j з вихідною ознакою y показав, що лише між y (КТП) та x_1 (рН модельних оборотних вод) і x_2 (концентрація в них хлоридів, мг/л) є слабка кореляція з коефіцієнтами кореляції $r(x_1, y) = 0,52$ та $r(x_2, y) = -0,66$. При цьому коефіцієнти парної кореляції решти вхідних ознак $x_3 \dots x_{15}$ з вихідною ознакою y (КТП) змінювалися від $r(x_{13}, y) = |-0,0197|$ до $r(x_5, y) = |-0,2997|$ (табл. 2).

Навіть ці первинні дані кореляційного аналізу вхідних ознак x_j з вихідними y можуть свідчити, що параметри модельних оборотних вод рН і концентрація в них хлоридів найбільше впливають на y (КТП). Це узгоджується з даними праць [13-15]. Зокрема, в праці [13] для сталі AISI 321 було встановлено, що вплив параметрів середовища на її КТП найсуттєвіший, однак гетерогенність сталі, яка залежить від вмісту в ній хрому, кремнію, марганцю та азоту, також суттєво впливає на її пітинготривкість в оборотних водах. У праці [14] виявлено, що вплив параметрів хлоридовмісного середовища на КТП сталі AISI 304 вдвічі вищий, ніж її структурної гетерогенності. Разом з тим, для сталей аустенітного класу AISI 304, 08X18H10, AISI321, 12X18H10T показано, що вплив параметрів модельних оборотних вод на КТП цих сталей найсуттєвіший, їх структурної гетерогенності дещо менший, а хрому – низький, але вартий того, щоб його враховувати при оцінці пітинготривкості сталей цього класу [15].

Аналіз даних (табл. 3) показав сильну кореляцію середнього діаметра зерна аустеніту сплаву (d_3) з поверхнево-активними або здатними до сегрегації межами зерен аустеніту хімічними елементами в його складі.

Зокрема, встановлено такі коефіцієнти парної кореляції $r(x_4, x_{15}) = 0,94$; $r(x_6, x_{15}) = -0,89$; $r(x_{12}, x_{15}) = -0,91$; $r(x_8, x_{15}) = -0,8$. Вони показують, що середній діаметр зерна аустеніту (d_3) сплаву зростає зі збільшенням у ньому вмісту марганцю (x_4) та зменшенням Cr (x_6), Cu (x_{12}) і Ti (x_8). Водночас між вмістом Mn (x_4) в сплаві та Cu (x_{12}) виявлено сильну парну кореляцію з коефіцієнтом $r(x_4, x_{12}) = -0,98$, що може свідчити про те, що марганець знижує розчинність Cu в твердому розчині аустеніту, збільшуючи його сегрегацію межами зерен аустеніту. Це може сприяти зменшенню середнього діаметру зерна аустеніту (d_3) сплаву та росту його

КТП в модельних оборотних водах, оскільки згідно з розробленою математичною моделлю (3) вона підвищується на $5,9^\circ\text{C}$ зі зменшенням параметра d_3 від 31 плавка 4 до 11 мкм плавка 1 сплаву 06XH28MДТ (3) (рис. 1).

Аналогічно марганцю сірка, розчинена в твердому розчині аустеніту сплаву, сприяє зниженню розчинності в ньому фосфору, оскільки $r(x_9, x_{10}) = -0,98$. Це може сприяти збільшенню вмісту фосфору, сегрегованого межами зерен аустеніту, та зменшенню середнього діаметра зерна аустеніту. Така тенденція, як згадувалось вище, сприяє росту КТП сплаву та його пітинготривкості в модельних оборотних водах.

Узагальнюючи вищеведене, можна відзначити, що хром, мідь та титан, розчинені у твердому розчині аустеніту сплаву, сприяють зменшенню його середнього діаметру зерна та підвищенню КТП. Проте, марганець, розчинений в твердому розчині аустеніту, сприяє росту d_3 та зменшенню КТП сплаву. До того ж він сприяє зниженню розчинності Cu ($r(x_4, x_{12}) = -0,98$) та Ti ($r(x_4, x_8) = -0,82$) в твердому розчині аустеніту, що також призводить до росту d_3 та зниження КТП сплаву:

$$\text{КТП} = 1,724\text{pH} - 0,03333\text{C}_{\text{Cl}} - 1,9256\text{Cr} + 2,9918\text{Ni} + 8,4109\text{Mo} + 4,4688\text{V}_{\text{H}} - 0,29592d_3. \quad (3)$$

Слід відзначити, що мінімальне абсолютне значення модуля миттєвої похибки для моделі (3) E_{min} становить $0,0054^\circ\text{C}$, а $E_{\text{max}} = 5,7771^\circ\text{C}$, $E_{\text{cp}} = 1,608566^\circ\text{C}$, $E_{\text{сум}} = 201,0708^\circ\text{C}$.

Ця модель цілком придатна для оцінки і прогнозування пітинготривкості теплообмінників зі сплаву 06XH28MДТ та його аналогу сталі AISI904L та дуже корисна для аналізу механізмів впливу їх хімічного складу і структурної гетерогенності на КТП тобто пітинготривкість у модельних оборотних водах.

Аналіз розробленої математичної моделі (3) показав, що U (КТП) сплаву 06XH28MДТ зростає зі збільшенням рН ($\times 1$) модельних оборотних вод, вмісту в ньому Ni ($\times 7$), Mo ($\times 11$), V_H ($\times 13$) та зменшенням концентрації хлоридів ($\times 2$) в досліджуваних хлоридовмісних середовищах, вмісту Cr (x_6) та d_3 ($\times 15$). У працях [3, 4, 6, 17] згадувалось, що пітинги утворюються в околі включень. До того ж за даними праці [16] розмір включень та їх хімічний склад має значення, оскільки дрібні включення не можуть ініціювати пітингову корозію.

Таблиця 2 – Коефіцієнти парної кореляції вхідних ознак з вихідною ознакою $r(x_j, y)$

j	1	2	3	4	5	6	7	8
$r(x_j, y)$	0,5191	-0,6581	0,0536	-0,2164	-0,2997	0,2047	-0,2101	0,0721
j	9	10	11	12	13	14	15	
$r(x_j, y)$	0,0438	-0,0686	0,2961	0,2484	-0,0197	0,2117	-0,2545	

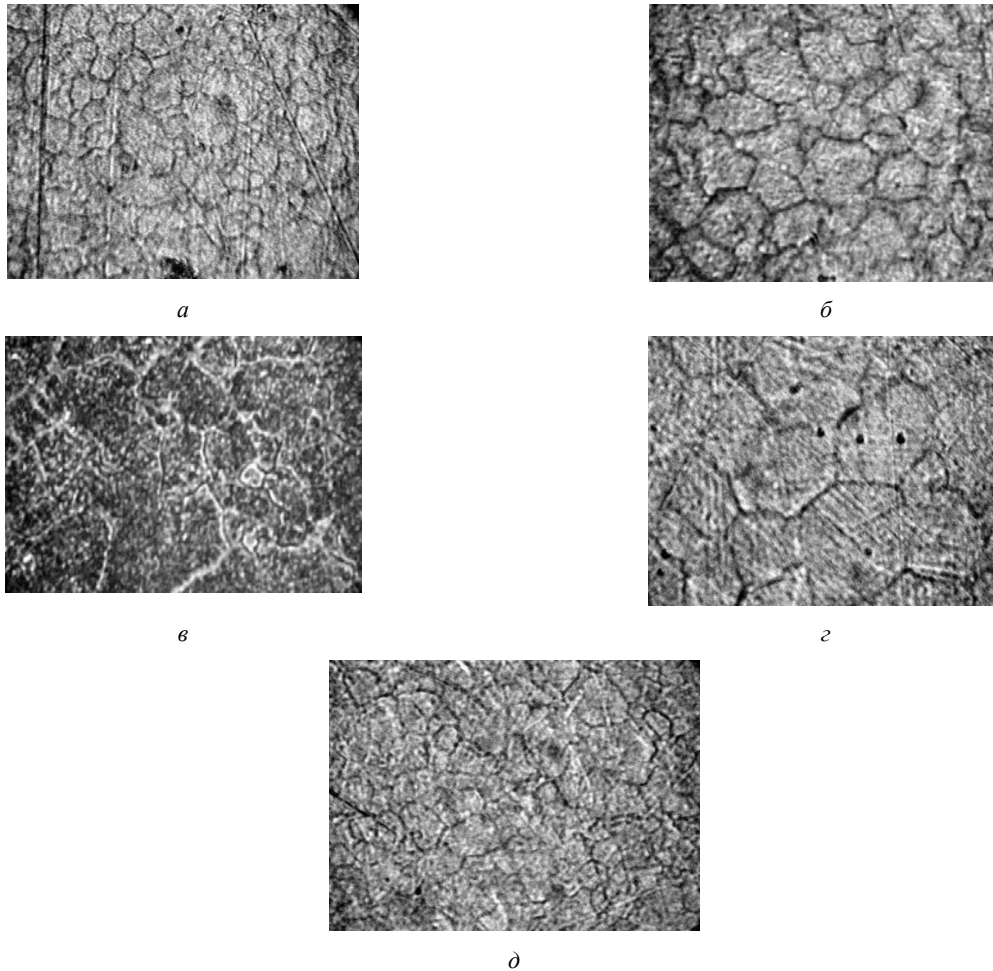


Рисунок 1. Зерно аустеніту у плавках сплаву 06ХН28МДТ ($\times 450$): $a - d_3 = 11$ мкм; $б - d_3 = 24$ мкм; $в - d_3 = 29$ мкм; $г - d_3 = 31$ мкм; $д - d_3 = 15$ мкм

Однак, комплексні дослідження цього процесу [13–15] показали, що дрібні включення, розташовані на перетині з межами зерен аустеніту, є осередком зародження і росту стабільних пітингів, а вплив середнього діаметру зерна аустеніту на КТП досліджуваних сталей може свідчити про це, оскільки в цих працях незалежно від марки сталей встановлено, що КТП досліджуваних сталей AISI304, 08X18N1, AISI321, 12X18N10T зростає зі збільшенням їх середнього діаметра зерна аустеніту. Це зумовлено тим, що більше середній діаметр зерна аустеніту, то менше вірогідність перетину його зерен із включеннями, в околі яких зароджуються стабільні пітинги. Це можна пояснити тим, що концентрація дефектів структури в таких місцях максимальна.

Протилежну залежність встановлено для сплаву 06ХН28МДТ, оскільки його КТП знижується зі збільшенням середнього діаметру зерна аустеніту (3). Це зумовлено тим, що в сплав на 5...6 мас. % більше хрому і близько на 10 мас. % нікелю, ніж у вищезгаданих сталях, та його додатково леговано молібденом. Відомо

[10, 13–15], що ці хімічні елементи покращують захисні властивості оксидних плівок на поверхні сталей та сплавів у хлоридвмісних середовищах. За таких умов пітинги на поверхні сплаву будуть утворюватися в околі включень, що на перетині з межами зерен аустеніту. Крім того, що більший середній діаметр зерна аустеніту, то більший ступінь некогерентності між суміжними ґратками зерен і, очевидно, більше дефектів структури аустеніту та вища вірогідність зародження і росту стабільних пітингів. При цьому, як встановлено з аналізу математичної моделі (3), природа включень відіграє роль у процесі пітингування, але розміри включень нітридів титану не впливають на пітинготривкість сплаву. Адже виявлено (3), що його КТП зростає лише на $0,4^\circ\text{C}$ зі збільшенням об'єму нітридів титану від 0,0931 до 0,1918 мас. % [10]. Проте, аналіз математичної моделі (3) показав, що КТП сплаву 06ХН28МДТ зростає на $6,9^\circ\text{C}$ зі збільшенням рН модельних оборотних вод від 4 до 8 та на $8,3^\circ\text{C}$ зі зменшенням у них концентрації хлоридів від 600 до 350 мг/л.

Таблиця 3 – Коефіцієнти парної кореляції вхідних ознак між собою $r(x_i, x_j)$.

$i \backslash j$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	1												
4		0	0	0,2974	1											
5		0	0	-0,3110	0,6516	1										
6		0	0	-0,6860	-0,7437	-0,3970	1									
7		0	0	-0,0045	0,6629	0,8657	-0,4387	1								
8		0	0	-0,7631	-0,8211	-0,1958	0,7965	-0,4324	1							
9		0	0	-0,5005	0,2314	0,2466	0,4636	0,3064	0	1						
10		0	0	0,3614	-0,2349	-0,2166	-0,4135	-0,3847	0,0947	-0,9759	1					
11		0	0	0,0433	-0,3055	-0,6063	0,5899	-0,3037	0,0115	0,5607	-0,6332	1				
12		0	0	-0,0959	-0,9776	-0,7680	0,6506	-0,7045	0,6835	-0,3118	0,2849	0,3742	1			
13		0	0	0,3104	0,6960	0,0105	-0,3584	0,0069	-0,6938	0,3641	-0,3204	-0,6291	-0,6291	1		
14		0	0	-0,3689	-0,3048	-0,5257	0,7114	-0,5836	0,2952	0,5902	-0,5037	0,7359	0,2818	0,3782	1	
15		0	0	0,4076	0,9397	0,7000	-0,8947	0,7193	-0,7995	-0,0574	0,0280	-0,5311	-0,9071	0,4651	-0,6069	1

Така тенденція узгоджується із загальновідомими даними та для сталей AISI304 [14], AISI321 [13] і 08X18H10, 12X18H10T [15] за аналогічних умов випробувань. Слід відзначити незначний вплив зміни вмісту нікелю у сплаві на його КТП, оскільки за даними аналізу моделі (3) вона зростає лише на 1°C зі збільшенням у ньому вмісту нікелю від 27,39 до 27,73 мас. %.

Вплив молібдену в сплаві на його пітинготривкість виявився суттєвішим, ніж нікелю, оскільки згідно з даними аналізу математичної моделі (3) його КТП зростає

на 3,3°C зі збільшенням його вмісту від 2,51 до 2,9 мас. %. Запропоновано багато моделей, що пояснюють цей позитивний вплив. Вважають [18], що молібден збільшує опір пасивних плівок до «пробою» у хлоридовмісних середовищах, підвищує пасиваційні характеристики і знижує швидкість розчинення металу в пітингах [19]. У праці [20] встановили, що молібден разом з хромом утворюють у пасивній плівці змішані оксиди, які корозійнотривкіші за оксиди хрому. Ми також підтримуємо таку гіпотезу, оскільки між вмістом молібдену і

хрому в сплаві є слабка парна кореляція $r(\times 11, \times 6) = 0,58$. При цьому коефіцієнт парної кореляції між ними може свідчити, що ці елементи збільшують розчинність один одного у твердому розчині аустеніту сплаву (табл. 3). Хром, не розчинений у твердому розчині аустеніту, утворює карбіди, які блокують рост середнього діаметру зерна аустеніту. Про це може свідчити коефіцієнт парної кореляції між вмістом хрому ($\times 6$) в сплаві та його середнім діаметром зерна аустеніту $d_z (\times 15)$ $r = (\times 6, \times 15) = -0,89$ (табл. 3). В цьому проявляється позитивний вплив хрому, нерозчиненого в твердому розчині аустеніту, оскільки КТП сплаву 06ХН28МДТ знижується на 5,9 °С зі збільшенням d_z аустеніту від 11 до 31 мкм. Водночас карбіди хрому, розташовані на перетині з межами зерен аустеніту, можуть бути осередком зародження і росту стабільних пітингів і в цьому полягає негативна роль хрому в сплаві. Отже, виходить, що розміри включень у сплаві 06ХН28МДТ на відміну від сталей AISI304, 08Х18Н1, AISI321, 12Х18Н10Т [13–15] не мають пріоритетного значення для зародження і росту стабільних пітингів. Це підтверджується даними аналізу математичної моделі (3), зокрема згідно з нею, КТП сплаву зростає лише на 0,4°С зі збільшенням в ньому об'єму нітридів титану $V_n(\times 13)$ від 0,0931 до 0,1918 %.

Узагальнюючи вищевикладене, можна зазначити, що КТП сплаву 06ХН28МДТ зростає зі збільшенням рН модельних оборотних вод, вмісту в ньому нікелю, молібдену, об'єму нітридів титану та зменшенням концентрації хлоридів у середовищі, вмісту хрому та середнього діаметру зерна аустеніту. При цьому вплив параметрів хлоридовмісного середовища на їх пітинготривкість, як і для сталей досліджених у працях [13–15], найсуттєвіший, а вмісту у ньому хрому та середнього діаметра зерна аустеніту – менший.

Висновки

За результатами дослідження корозійної поведінки сплаву 06ХН28МДТ в модельних хлоридовмісних оборотних водах побудовано математичну модель, яка ґрунтується на багатомірних лінійних регресіях першого порядку та встановлює взаємозв'язок між його КТП (аналог сталі AISI904L) та хімічним складом, елементами структури і параметрами середовища. Встановлено, що значимими змінними параметрами, які визначають критерій пітинготривкості сплаву, є концентрація хлоридів у модельних оборотних водах та її рН, середній діаметр зерна аустеніту і вміст у ньому Cr в межах стандарту. Зокрема виявлено, що КТП сплаву зростає на 8,3°С зі зниженням концентрації хлоридів у модельних оборотних водах від 600 до 350 мг/л, на 6,8°С зі збільшенням їх рН від 4 до 8, на 5,9 °С зі зменшенням середнього діаметру зерна аустеніту від 31 до 11 мкм та на 4,7°С зі зменшенням у ньому вмісту хрому від 24,31 до 21,84 мас. %, Показано, що розроблену математичну модель можна використовувати для оцінки та прогнозування пітинготривкості теплообмінників зі сплаву 06ХН28МДТ за можливої зміни параметрів оборотних вод (рН, концентрації хлоридів) під час їх експлуатації

залежно від вмісту у ньому Cr і середнього діаметру зерна аустеніту. При виробництві теплообмінників зі сплаву 06ХН28МДТ, що працюють в водооборотних системах підприємств, рекомендовано вибирати плавки з мінімальним вмістом хрому в межах стандарту на його виробництво та середнім діаметром зерна аустеніту близьким 10 мкм.

Список літератури

1. Oh Y.-K. Recent developments and key barriers to advanced biofuels: A short review. / Y.-K. Oh, K.-R. Hwang, C. Kim, et. al. // Bioresource Technology. – 2018. – Vol. 257. – P. 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.089>
2. Torres C.E.A.S., Santos T.E., Lins V.F.C. Corrosion failures of austenitic and duplex stainless steels in a biodiesel plant / C.E.A.S. Torres, T.E. Santos, V.F.C. Lins // Revista Materia. – 2020. – Vol. 25? No 2. – P. 25–36. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1020>
3. Нарівський О. Е. Корозійне руйнування пластинчастих теплообмінників / Нарівський О. Е. // Фізико-хімічна механіка матеріалів.– 2005. – № 1. – С. 104–108.
4. Нарівський О. Е. Корозійні процеси і швидкість росту пітингів сталей AISI 304 та 08Х18Н10Т у модельних оборотних водах/ О.Е. Нарівський, Н.А. Солідор // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. – 2011. – №23, С. 86–96. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.23.2011.22895>
5. Наривский А. Э. Влияние легирующих элементов и структурной гетерогенности стали AISI 321 на селективное растворение металлов из питтингов / А. Э. Наривский, Г. Ш. Яр-Мухамедова // Вестник. Серія: Физическая (ВКФ). – 2016. – №56, (1). – С. 86-96.
6. Наривский А. Э. Характерные особенности селективного растворения питтингов на поверхности стали AISI 321 в модельных оборотных водах / А. Э. Наривский, С. Б. Беликов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 1. – С. 24–31. <https://doi.org/10.15588/v0i1.98905>
7. Wang W., Jenkins P.E., Ren Z. Heterogeneous corrosion behavior of carbon steel in water contaminated biodiesel / W. Wang, P.E. Jenkins, Z. Ren. // Corrosion Science. – 2011. – Vol. 53. – P. 845-849. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.10.020>
8. Нарівський О. Е. Кінетика корозійних процесів та швидкість пітингування сплаву 06ХН28МДТ у слабких хлоридовмісних середовищах / Нарівський О. Е. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник, Луцьк. – 2011. – № 31. – С. 214–220.
9. Нарівський О. Е. Закономірності корозійного розчинення та швидкість пітингування сплаву 06ХН28МДТ у нейтральних хлоридовмісних розчинах / Нарівський О. Е. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник, Луцьк. – 2011. – № 32. – С. 255–261.
10. Нарівський О. Е. Оцінка стійкості сплаву 06ХН28МДТ до пітингової та щільної корозії в хло-

ридовмісних середовищах / О. Е. Нарівський, С. Б. Бєліков // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 2. – С. 45–53.

11. Narivs'kyi O. E. Pitting resistance of 06KhN28MDT alloy in chloride-containing media / O. E. Narivs'kyi, S. B. Belykov // Materials Science. – 2008. – Vol. 44, No 4. – P. 573–580. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9107-5>

12. Freedman D. A. Statistical models: theory and practice / Freedman D. A. // Cambridge University Press. – 2005. – 458 p.

13. Influence of chloride-containing media on the pitting resistance of AISI 321 steel / O. E. Narivskiy, S. B. Belikov, S. A. Subbotin, T. V. Pulina // Materials Science. – 2021. – Vol. 57, No. 2. – P. 291–297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00544-z>

14. Narivskiy O.E. Assessment and prediction of the pitting resistance of plate-like heat exchangers made of AISI304 steel and operating in circulating waters / O.E. Narivskiy, S.A. Subbotin, T.V. Pulina, M.S. Khoma // Materials Science. – 2022. – Vol. 58. – P. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00628-4>

15. Mathematical modeling of the corrosion behavior of austenitic steels in chloride-containing media during the operation of plate-like heat exchangers / O. Narivs'kyi, R. Atchibayev, A. Kemelzhanova et al. // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2022. – Vol. 24, No 4.

– P. 295–301. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj1473>

16. Park J.O. Effects of temperature and chloride concentration on pit initiation and early pit growth of stainless steel / J.O. Park, S. Matsch, H. Bohni // Journal of The Electrochemical Society. – 2002. – Vol. 149, No 2. – P. 34–39.

17. Narivskiy A. E. Determination of pitting resistance steel AISI 321 in chloride-containing environments is present in the heat-exchanger / Narivskiy A. E. // Physicochemical mechanics of materials. Special Issue. – 2006. – № 5. – С. 316–320.

18. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of metals / Szklarska-Smialowska Z. // National Association of corrosion Engineers. – Houston, 1986. – P. 147–170.

19. Yar-Mukhamedova G. S. Adsorption of the Components of a Chrome-Plating Electrolyte on Dispersed Corundum Particles / G. S. Yar-Mukhamedova, A. M. Darisheva, E.S. Yar-Mukhamedov // Materials Science. – 2019. – 54(6). – P. 907–912.

20. Features of Plasma-Electrolyte Synthesis of Heterooxide Nanocomposites on Multicomponent Alloys of Valve Metals / H. V. Karakurkchi, N. D. Sakhnenko, A.N. Korohodska et al. // Springer Proceedings in Physics. – 2023. – 280. – P. 123–147.

Одержано 19.07.2023

MATHEMATICAL MODELING OF PITTING RESISTANCE IN 06XH28MDT ALLO-HEAT EXCHANGERS EXPOSED TO CIRCULATING WATERS

- Dzhus A. Assistant of the “Physical Materials Science” department, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: anna-92@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6474-0732
- Narivskiy O. Dr. Sc., Technical Director of Ukrspetsmash LLC, Berdiansk, Ukraine, *e-mail*: amz309@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5608-1474
- Byelikov S. Dr. Sc., Professor of National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: belikov@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Subbotin S. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of software tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: subbotin.csit@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5814-8268
- Pulina T. Dr. of Ec., Professor, Head of the Department of Management, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: pulinatv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2672-8281
- Leoshchenko S. Assistant of the Department of software tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, *e-mail*: sedrikleo@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5099-5518

Purpose. The aim of the study is to develop mathematical models that describe the dependences of critical pitting temperatures of 06XH28MDT alloy (analogous to AISI904L steel) in model circulating waters with pH 4...8 and chloride concentration from 350 to 600 mg/L.

Research methods. The developed mathematical models are based on multivariate linear regressions of the first order and multivariate quadratic regressions with a combination of features.

Results. It has been established that the critical pitting temperatures of the 06XH28MDT alloy increase with increasing pH of model circulating waters, Ni, Mo content, volume of titanium nitrides, and decreasing chloride concentration in the medium, Cr content within the standard, and average austenite grain diameter.

Scientific novelty. Based on the established dependencies between the critical pitting temperatures of the 06XH28MDT alloy and its chemical composition within the standard and structural heterogeneity, the mechanisms of their influence on the pitting resistance of this structural material in recycled industrial waters were developed. It was found that the size of inclusions of titanium nitrides and oxysulfides in the alloy does not affect the probability of the formation and growth of stable pitting in their vicinity in chloride-containing media.

Practical value. To apply the developed mathematical models to the selection of the most resistant to pitting in recycled industrial waters of 06XH28MDT alloy melts and to predict their pitting during the use of heat exchangers have been offered.

Key words: 06XH28MDT steel, AISI904L, CPT, critical pitting temperature, pitting corrosion, heat exchanger, circulating water.

References

1. Oh, Y.-K., Hwang, K.-R., Kim, C., et al. (2018). Recent developments and key barriers to advanced biofuels: A short review. *Bioresource Technology*, 257, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.089>
2. Torres, C.E.A.S., Santos, T.E., and Lins, V.F.C. (2020). Corrosion failures of austenitic and duplex stainless steels in a biodiesel plant. *Revista Materia*, 25(2), 25–36. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1020>
3. Narivskiy, O. E. (2005). Corrosion destruction of plate like heat exchangers. *Physical and Chemical Mechanics of Materials*, 1, 104–108.
4. Narivskiy, O. E., and Solidor, N. A. (2011). Corrosion processes and growth speed of pitting of AISI 304 and 08Kh18N10T steels in model circulating waters. *Bulletin of Priazovsky State Technical University. Series: Technical Sciences*, 23, 86–96. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.23.2011.22895>
5. Narivskiy, A. E., and Yar-Mukhamedova, G.Sh. (2016). Influence of alloying elements and structural heterogeneity of AISI 321 steel on selective dissolution of metals from pittings. *Bulletin. Series Physical (VKF)*, 56(1), 86–96.
6. Narivskiy, A. E., and Belikov, S. B. (2015). Characteristic features of selective pitting dissolution on the AISI 321 steel surface in model circulating waters. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 1, 24–31. <https://doi.org/10.15588/v0i1.98905>
7. Wang, W., Jenkins, P.E., and Ren, Z. (2011). Heterogeneous corrosion behavior of carbon steel in water contaminated biodiesel. *Corrosion Science*, 53, 845–849. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.10.020>
8. Narivskiy, O. E. (2011). Kinetics of corrosion processes and pitting speed of 06KhN28MDT alloy in weakly acidic chloride-containing media. *Scientific notes. Interuniversity collection, Lutsk*, 31, 214–220.
9. Narivskiy, O. E. (2011). Corrosion dissolution patterns and pitting speed of 06KhN28MDT alloy in neutral chloride-containing solutions. *Scientific notes. Interuniversity collection, Lutsk*, 32, 255–261.
10. Narivskiy, O. E., and Belikov, S. B. (2007). Pitting resistance evaluation of 06KhN28MDT alloy and crevice corrosion in chloride-containing media. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2, 45–53.
11. Narivskiy, O. E., and Belykov, S. B. (2008). Pitting resistance of 06KhN28MDT alloy in chloride-containing media. *Materials Science*, 44(4), 573–580. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9107-5>
12. Freedman, D. A. (2005). *Statistical models: theory and practice*. Cambridge University Press.
13. Narivskiy, O. E., Belikov, S. B., Subbotin, S. A., and Pulina, T.V. (2021). Influence of chloride-containing media on the pitting resistance of AISI 321 steel. *Materials Science*, 57(2), 291–297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00544-z>
14. Narivskiy, O. E., Subbotin, S. A., Pulina, T. V., and Khoma, M.S. (2022). Assessment and prediction of the pitting resistance of plate-like heat exchangers made of AISI304 steel and operating in circulating waters. *Materials Science*, 58, 41–46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00628-4>
15. Narivskiy, O., Atchibayev, R., Kemelzhanova, A., Yar-Mukhamedova, G., Snizhnoy, G., Subbotin, S., and Beisebayeva, A. (2022). Mathematical modeling of the corrosion behavior of austenitic steels in chloride-containing media during the operation of plate-like heat exchangers. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 24(4), 295–301. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj1473>
16. Park, J.O., Matsch, S., and Bohni, H. (2002). Effects of temperature and chloride concentration on pit initiation and early pit growth of stainless steel. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(2), 34–39.
17. Narivskiy, A. E. (2006). Determination of pitting resistance steel AISI 321 in chloride-containing environments is present in the heat-exchanger. *Physicochemical mechanics of materials. Special Issue*, 5, 316–320.
18. Szklarska-Smialowska, Z. (1986). Pitting corrosion of metals. *National Association of corrosion Engineers*, 147–170.
19. Yar-Mukhamedova, G. S., Darisheva, A. M., and Yar-Mukhamedov, E.S. (2019). Adsorption of the Components of a Chrome-Plating Electrolyte on Dispersed Corundum Particles. *Materials Science*, 54(6), 907–912.
20. Karakurkchi, H. V., Sakhnenko, N. D., Korohodska, A. N., Stepanova, I. I., and Zyubanova, S. I. (2023). Features of Plasma-Electrolyte Synthesis of Heterooxide Nanocomposites on Multicomponent Alloys of Valve Metals. *Springer Proceedings in Physics*, 280, 123–147.