

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

### MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 537.622.3:620.193.4:669.15

- Нарівський О. Е. д-р техн. наук, технічний директор ТОВ «Укрспецмаш», м. Бердянськ, Україна, e-mail: amz309@ukr.net, ORCID 0000-0002-5608-1474
- Сніжної Г. В. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: snow@zpu.edu.ua, ORCID 0000-0003-1452-0544
- 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
- Леощенко С. Д. асист. кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: sedrikleo@gmail.com, ORCID 0000-0001-5099-5518
- 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
- Сніжної В. Л. канд. фіз.-матем. наук, доцент, провідний фахівець навчально-наукової лабораторії Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: valentinsnezhnoy@gmail.com

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОРОЗІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕЙ АУСТЕНІТНОГО КЛАСУ В ХЛОРИДОВІСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ПРИ РОБОТІ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

**Мета роботи.** Полягає у розробці математичних моделей, які описують залежності критичних температур пітингування сталей AISI 304, 08X18H10, AISI 321, 12X18H10T у модельних оборотних водах з рН 4...8 та концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л.

**Методи дослідження.** Розроблені математичні моделі ґрунтуються на лінійних квадратичних регресіях і нейронній мережі прямого поширення сигналу для скороченого набору ознак.

**Отримані результати.** Встановлено, що критичні температури пітингування досліджуваних аустенітних хромонікелевих сталей зростають при збільшенні рН оборотної води, кількості оксидів розміром до 3,95 мкм, середньої відстані між нітридами титану, вмісту Cr та зменшенні концентрації хлоридів у оборотних водах, середньої відстані між оксидами, середнього діаметра зерна аустеніту.

**Наукова новизна.** На підставі встановлених залежностей між критичними температурами пітингування корозійнотривких сталей AISI 304, 08X18H10, AISI 321, 12X18H10T їх хімічним складом у межах стандарту та структурною гетерогенністю розроблено механізми їх впливу на пітинготривкість цих конструкційних матеріалів в оборотних хлоридовісних водах. Встановлено, що метастабільні пітинги утворюються в твердому розчині аустеніту сталей в околі оксидів розміром 1,98...3,95 мкм і репасивуються не досягнувши критичних розмірів близько 5 мкм, що сприяє зростанню їх пітинготривкості в оборотних хлоридовісних середовищах.

**Практична цінність.** Розроблені математичні моделі запропоновано застосовувати для вибору оптимальних плавок аустенітних хромонікелевих сталей для виробництва теплообмінників та прогнозування їхньої пітинготривкості в процесі їх експлуатації в оборотних водах. Виявлено процеси, що сприяють перфорації теплопередаючих елементів теплообмінників при їх експлуатації.

**Ключові слова:** пластинчасті теплообмінники, оборотні води, пітингова корозія, структура, нейронні мережі.

**Вступ**

Для дослідження пітингової корозії використовуються різні методи, за допомогою яких досягнуто значного прогресу [1]. У статті [2] повідомляється про покращення тривкості до корозії після плазмового азотування. Висока інтенсивність корозії спостерігається в решітках сепаратора, які піддаються впливу вологості повітря, забрудненого сірководнем [3].

Корозійноотривкі сталі аустенітного класу використовують у виробництві теплообмінного обладнання, враховуючи їх високу корозійну тривкість у багатьох середовищах [4]. На сьогодні широко поширені пластинчасті теплообмінники, тому що вони компактніше кожухотрубчастих, а також мають меншу вагу та ефективнішу теплопровідність внаслідок меншої товщини (0,3...1,0 мм проти 1,0...3,0 мм) теплопередаючих елементів. Однак це підвищує ймовірність перфорації пластинчастих теплообмінників у разі пітингової корозії в оборотних водах, які застосовуються для охолодження технологічних продуктів у хімічній, нафтогазопереробній, енергетичній та ін. галузях промисловості [5-8]. Тому актуальною проблемою є оцінка пітинготривкості конструкційних матеріалів, з яких виробляють теплообмінники, і прогнозування їх корозійної поведінки при експлуатації. У роботах [9, 10] встановлено, що параметри оборотної води і структурна гетерогенність сталей AISI 304, 12X18H10T, 08X18H10, AISI 321 суттєво впливають на їх пітинготривкість в оборотних водах, а вплив їх хімічного складу не є значним і визначається тільки кількістю Сг в їх складі.

**Мета роботи**

Для визначення ролі хрому та складових структур сталей AISI 304, 12X18H10T, 08X18H10, AISI 321 в їх пітинготривкості та її прогнозуванні були побудовані математичні моделі, які ґрунтуються на лінійних квадратичних регресіях і на двошаровій нейронній мережі прямого поширення сигналу для скороченого набору вхідних ознак.

**Матеріал і методика досліджень**

Досліджували по п'яти промислових плавок сталей аустенітного класу AISI 304, AISI 321 і по одній 12X18H10T і 08X18H10. Їх хімічний склад представлено в (табл. 1, 2), а структурну гетерогенність визначено раніше в працях [6, 7].

**Таблиця 1** – Хімічний склад сталей AISI 304 і 08X18H10 (мас. %)

	№ плавки сталей AISI 304					08X18H10
	1	2	3	4	5	
C	0,071	0,067	0,075	0,050	0,030	0,060
Mn	1,23	1,74	1,65	1,70	1,81	1,34
Si	0,22	0,50	0,43	0,41	0,39	0,32
Cr	17,96	18,22	18,25	18,30	18,10	17,44
Ni	9,34	8,09	8,09	8,10	8,20	9,77
N	0,048	0,046	0,055	0,044	0,039	–
Ti	–	–	–	–	–	–
S	0,001	0,001	0,004	0,002	0,001	0,006
P	0,027	0,028	0,024	0,028	0,034	0,035

**Таблиця 2** – Хімічний склад сталей AISI 321 і 12X18H10T (мас.%)

	№ плавки сталей AISI 321					12X18H10T
	1	2	3	4	5	
C	0,035	0,060	0,064	0,030	0,040	0,070
Mn	1,66	1,59	1,22	1,62	1,70	1,70
Si	0,54	0,66	0,52	0,41	0,49	0,49
Cr	17,10	16,43	17,43	17,41	17,70	17,97
Ni	9,10	9,14	9,70	9,24	9,10	10,46
N	0,012	0,011	0,012	0,013	0,013	–
Ti	0,32	0,34	0,41	0,31	0,35	0,46
S	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,007
P	0,026	0,027	0,026	0,028	0,026	0,027

Математичні моделі залежності критичної температури пітингування (КТП) досліджуваних сталей залежно від їх хімічного складу, структурної гетерогенності [6, 7] та параметрів оборотних вод (рН 4...8, концентрація хлоридів  $C_{Cl} = 350, 400, 500, 550, 600$  мг/л) будували, застосовуючи лінійне квадратичне рівняння регресії [11]:

$$y = \sum_k w_k c_k, \quad (1)$$

де  $y$  – критична температура пітингування (КТП) сталей, °С;

$w_k$  – ваговий коефіцієнт складових;

$c_k$  – складова ознак  $x_i$ .

Зокрема, вихідною ознакою моделі (1) є КТП сталей AISI 304, 08X18H10, AISI 321, 12X18H10T у модельних оборотних водах, а змінними ознаками  $x_1$  – показники модельних оборотних вод (рН( $x_1$ ), вміст хлоридів ( $x_2$ )); складові структури сталей ( $x_3$  – об'єм оксидів, rot.%;  $x_4$  – кількість оксидів розміром до 1,98 мкм на 100 полях зору мікроскопа ( $\times 320$ ), од.;  $x_5$  – кількість оксидів розміром від 1,98 до 3,95 мкм на 100 полях зору мікроскопа, од.;  $x_6$  – середня відстань між оксидами, мкм;  $x_7$  – середній діаметр зерна аустеніту, мкм;  $x_8$  – об'єм  $\delta$ -фериту, rot.%; середня відстань між ними (мкм) та їх хімічний склад ( $x_9$  – вміст вуглецю, мас.%;  $x_{10}$  – марганцю;  $x_{11}$  – кремнію;  $x_{12}$  – хрому;  $x_{13}$  – нікелю;  $x_{14}$  – азоту;  $x_{15}$  – титану;  $x_{16}$  – сірки;  $x_{17}$  – фосфору) та  $x_{18}$  – питома магнітна сприйнятливість, м<sup>3</sup>/кг.

Раніш було встановлено кореляцію між питомою магнітною сприйнятливістю аустеніту і швидкістю корозії в хлоридовмісних середовищах [12], процентним вмістом хімічних елементів [13].

Нейромережна модель на основі двошарової нейронної мережі прямого поширення сигналу для скороченого набору вхідних ознак ( $x_1, x_2, x_6, x_{10}$  і  $x_{12}$ ) описана формулою (2):

$$y = w_0^{(2,1)} + \sum_{i=1}^{15} w_i^{(2,1)} \psi^{(1,i)} \left( w_0^{(1,i)} + \sum_{j=1}^7 w_j^{(1,i)} x_j^{(1,i)} \right), \quad (2)$$

де  $\psi^{(1,i)}(a) = \frac{2}{1 + e^{-2a}} - 1$  – функція активації  $i$ -го нейрона першого шару мережі;

$w_j^{(1,i)}$  – ваговий коефіцієнт  $j$ -го входу  $i$ -го нейрона першого шару мережі;

$w_i^{(2,1)}$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го входу єдиного нейрона другого шару мережі.

Вагові коефіцієнти регресійної моделі (1) визначали методом найменших квадратів, а якість математичних моделей оцінювали за сумою квадратів миттєвих помилок [11]:

$$E = \sum_{s=1}^S (y^s - y^{s*})^2, \quad (3)$$

де  $y^{s*}$  – розраховане значення вихідної ознаки для  $s$ -го екземпляра спостережень (КТП);

$y^s$  – значення вихідної ознаки для  $S$ -го екземпляра спостережень (КТП) визначених експериментально [6, 14].

### Результати досліджень та їх обговорення

Аналіз додатків  $C_k$ , розробленої лінійної квадратичної регресійної моделі (1) з урахуванням встановлених вагових коефіцієнтів  $w_k$  (табл. 3) показав, що КТП сталей AISI 304, 08X18H10, AISI 321 і 12X18H10T, які досліджували, збільшується на 54,2 °C з збільшенням рН( $x_1$ ) модельних оборотних вод від 4 до 8 (див. п. 1 табл. 3) та знижується на 12,0 °C з зростанням концентрації в ній хлоридів від 350 до 600 мг/л. Така тенденція узгоджується із відомими літературними даними [15–20]. Водночас слід відзначити, що з квадрата додатку  $x_2^2$  (табл. 3, п. 6) з урахуванням його вагового коефіцієнта  $w_k = -1,67 \cdot 10^{-5}$  зростання концентрації хлоридів  $x_2(C_{Cl})$  у вищезгаданих межах практично не впливає на значення  $y$ (КТП) сталей. При цьому для додатку  $x_1^2$  (рН) збільшення рН( $x_1$ ) модельних оборотних вод від 4 до 8 сприяє зниженню  $y$ (КТП) сталей на 47,3 °C (табл. 3, п. 5).

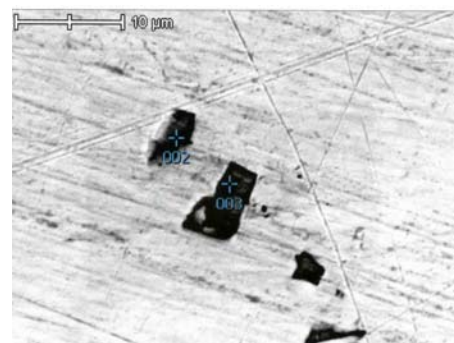
Разом з тим враховуючи, що для додатку  $x_1$  (табл. 3, п. 1) збільшення його значення у вищевказаних межах сприяє зростанню  $y$ (КТП) сталей на 54,2 °C, загальна загальновідома тенденція збільшення КТП сталей у хлоридовмісних середовищах не порушується.

Отже, можна констатувати факт, що  $y$ (КТП) сталей, що досліджували, у середньому зростає на 6,9 °C зі збільшенням рН( $x_1$ ) модельних оборотних вод від 4 до 8. Це узгоджується з експериментальними даними [8, 21].

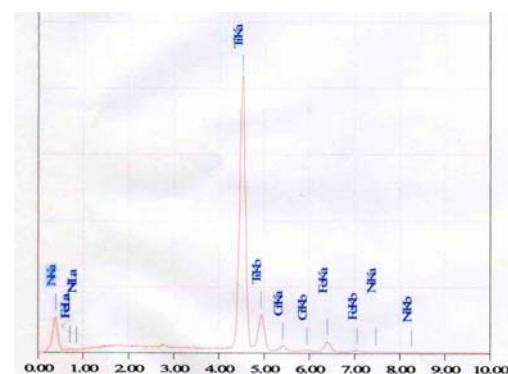
У сталях AISI 304 та 08X18H10 нітриди титану не виявлено, тому що вони, на відміну від сталей AISI 321 та 12X18H10T, не стабілізовані титаном (табл. 1, 2). При цьому в сталях AISI 321 і 12X18H10T вміст титану змінювалося від 0,32 мас.% (плавка 1) до 0,46 мас.% (сталь 12X18H10T), а об'єм нітридів титану – від 0,2336 об.% (плавка 4) до 0,4745 об.% (плавка 1) (рис. 1).

**Таблиця 3** – Складові ознак  $x_i$  та їх вагові коефіцієнти

№	Додатки, $C_k$	Ваговий коефіцієнт, $w_k$
1	$x_1$	13,54
2	$x_2$	-0,0481
3	$x_8$	0,0153
4	$x_{19}$	-0,0493
5	$x_1^2$	-0,9845
6	$x_2^2$	$-1,67 \cdot 10^{-5}$
7	$x_3^2$	$-8,34 \cdot 10^{-4}$
8	$x_4^2$	$1,22 \cdot 10^{-4}$
9	$x_5^2$	$6,9 \cdot 10^{-4}$
10	$x_6^2$	$-2,76 \cdot 10^{-4}$
11	$x_7^2$	-0,0014
12	$x_8^2$	$5,46 \cdot 10^{-6}$
13	$x_{10}^2$	-0,0076
14	$x_{12}^2$	0,1735
15	$x_{19}^2$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
16	$x_{20}^2$	0,0254



а



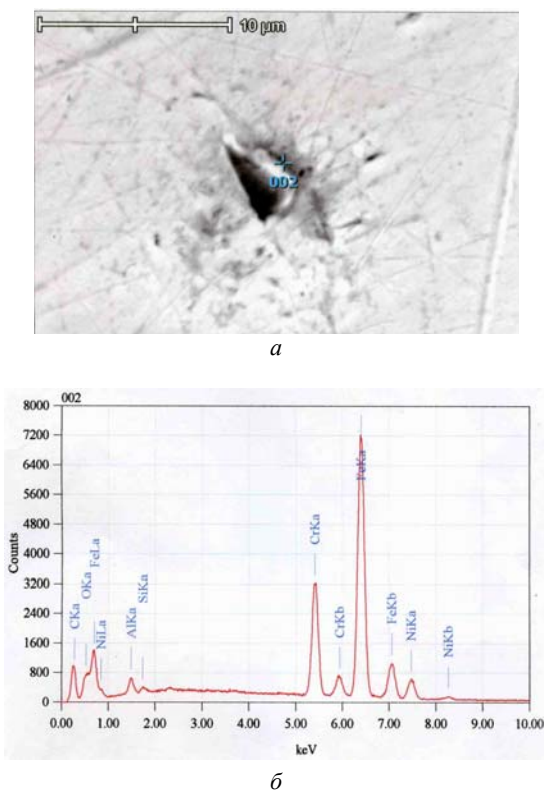
б

**Рисунок 1.** Ідентифікація включень нітриду титану в сталі AISI 321:

а – металографія ( $\times 1600$ ); б – енергодисперсійний аналіз

Таким чином, враховуючи дані (табл. 2) щодо вмісту азоту та титану в сталях AISI 321 та 12X18H10T, можна відзначити, що об'єм нітридів титану ( $x_{19}$ ) у цих сталях не залежить від вмісту в них цих хімічних елементів. До того ж згідно (табл. 3; п. 4, 15) зміна об'єму нітридів титану в цих сталях від 0 об.% сталі AISI 304 і 08X18H10 до 0,4745 об.% плавка 1 сталі AISI 321 не впливає на їх  $y(\text{КТП})$  у модельних оборотних водах. При цьому згідно (табл. 3; п. 16) та даних [20] збільшення середньої відстані між нітридами титану від 66 мкм плавка 5 сталі AISI 321 до 91 мкм плавка 2 сприяє зростанню їх  $y(\text{КТП})$  на 99 °С. Таким чином виходить, що більше середня відстань між нітридами титану в цих сталях, то менше їх розмір та вище  $y(\text{КТП})$ , яка характеризує пітінготривкість. Ці результати узгоджуються з даними праць [22, 23] щодо критичного об'єму включень, в околі яких можуть зароджуватися та розвиватися стабільні пітінги.

Об'єм оксидів ( $x_3$ ) у сталях, що досліджували, змінювався в діапазоні від 0,0027 об.% у сталі 12X18H10T [8] (рис.2) до 0,0324 об.% плавка 4 сталі AISI 304 [21] (рис. 3), тому згідно з (табл. 3; п. 7) вплив цього параметра на  $y(\text{КТП})$  практично відсутній.

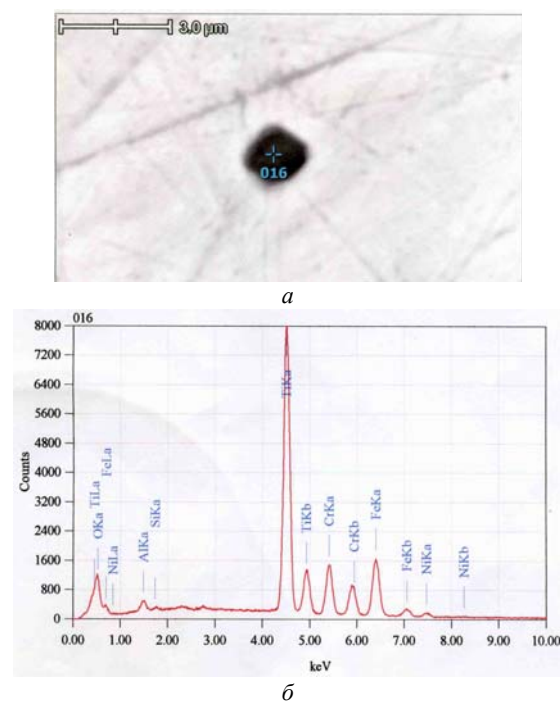


**Рисунок 2.** Ідентифікація включень оксиду алюмінію в сталі 12X18H10T:

*a* – металографія ( $\times 2800$ ); *б* – енергодисперсійний аналіз

Аналогічно нітридам титану та оксидам зміна об'єму  $\delta$ - фериту в цих сталях ( $x_8$ ) в діапазоні від

0,0138 об.% плавка 3 сталі AISI 304 до 0,372 об.% сталь 12X18H10T [6, 24] практично не впливає на їх  $y(\text{КТП})$  у модельних оборотних водах (табл. 3, п. 3, 12). Такі результати узгоджуються з даними праць [9] для сталі AISI 321 та [10] для AISI 304. Водночас згідно з даними (табл. 3, п. 8, 9)  $y(\text{КТП})$  сталей, що досліджували зростає на 22,1 °С та 54 °С зі збільшенням у них кількості оксидів розміром до 1,98 мкм ( $x_4$ ) від 12 одиниць сталь 12X18H10T до 425 плавка 1 сталь AISI 304 та від 1,98 до 3,95 мкм ( $x_5$ ) від 2-х одиниць сталь 12X18H10T до 280 од. сталь 08X18H10 [26] відповідно. Такі залежності обумовлені тим, що стабільні пітінги утворюються в околі включень, які більші за критичний розмір [22, 23], для сталей аустенітного класу близько 5 мкм [21] (рис. 4).



**Рисунок 3.** Ідентифікація включень оксиду титану у сталі 12X18H10T:

*a* – металографія ( $\times 5300$ ); *б* – енергодисперсійний аналіз

Аналогічно нітридам титану та оксидам зміна об'єму  $\delta$ - фериту в цих сталях ( $x_8$ ) в діапазоні від 0,0138 об.% плавка 3 сталі AISI 304 до 0,372 об.% сталь 12X18H10T [6, 24] практично не впливає на їх  $y(\text{КТП})$  у модельних оборотних водах (табл. 3, п. 3, 12). Такі результати узгоджуються з даними праць [9] для сталі AISI 321 та [10] для AISI 304. Водночас згідно з даними (табл. 3, п. 8, 9)  $y(\text{КТП})$  сталей, що досліджували зростає на 22,1 °С та 54 °С зі збільшенням у них кількості оксидів розміром до 1,98 мкм ( $x_4$ ) від 12 одиниць сталь 12X18H10T до 425 плавка 1 сталь AISI 304 та від 1,98 до 3,95 мкм ( $x_5$ ) від 2-х одиниць сталь 12X18H10T до 280 од. сталь 08X18H10 [26] відповідно. Такі залежності обумовлені тим, що стабільні пітінги утворюються в околі включень, які більші за критичний розмір [22, 23], для сталей аустенітного класу близько 5 мкм [21] (рис. 4).

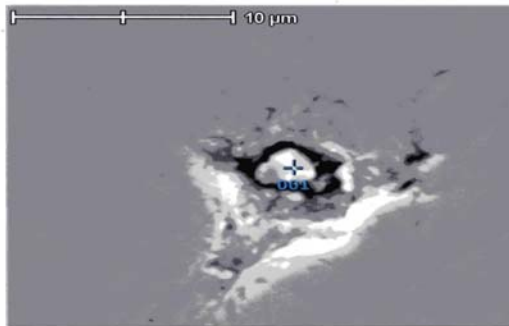
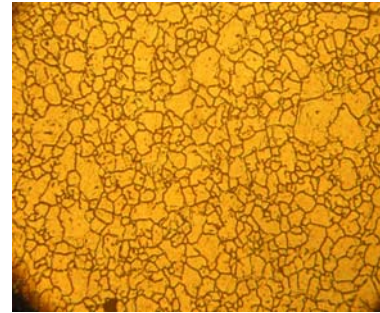


Рисунок 4. Пітінг в околі неметалевого оксидного включення ( $\times 6000$ )

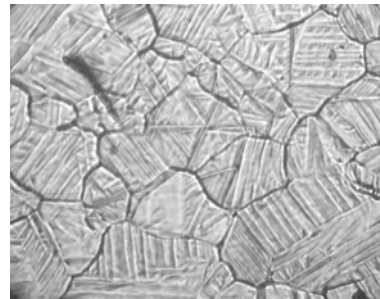
Відповідно у оксидів розмірами до 3,95 мкм утворювалися метастабільні пітінги, які згодом репасивувалися. При цьому відомо [25–27], що більше на поверхні сталей метастабільних пітінгів, то нижче ймовірність їх переходу в стабільний стан. Разом з тим слід зазначити, що стабільні пітінги можуть утворюватися в околі включень розміром значно менше 5 мкм, якщо вони перетинаються з межами зерен аустеніту. При цьому очевидно, що більше середній діаметр зерна аустеніту, то менше ймовірність перетину включень з межами зерен і, відповідно, нижче ймовірність пітінгової корозії та вище КТП сталей, за яких вона розвивається. Аналіз (табл. 3, п. 11) моделі (1) узгоджується з цим твердженням, оскільки встановлено, що  $y(\text{КТП})$  сталей, що досліджувалися знижується на умовні 135,5 °С зі збільшенням середнього діаметра зерна аустеніту від 23 мкм (рис. 5а) до 312 мкм (рис. 5б), оскільки що більше середній діаметр зерна, то вище ступінь некогерентності суміжних зерен та вище дефектність їх меж.

Крім того, слід зазначити, що теорія утворення стабільних пітінгів на перетині меж зерен аустеніту сталей з дрібними включеннями узгоджується з результатами аналізу (табл. 3, п. 10) моделі (1), тому що встановлено, що  $y(\text{КТП})$  сталей, що досліджуються, знижується на умовні 167,8 °С зі збільшенням середньої відстані між оксидами від 150 до 794 мкм. Адже очевидно, що більше середня відстань між включеннями в сталях, то менше їх розміри та більша кількість. При цьому виходить, що більше кількість оксидів у сталях, то вища ймовірність їх перетину з межами зерен аустеніту та вища ймовірність пітінгової корозії.

Узагальнюючи вищесказане, можна відзначити, що ризик пітінгової корозії сталей знижується зі збільшенням в них кількості оксидів розміром до 3,95 мкм, розташованих у твердому розчині аустеніту, внаслідок перерозподілу щільності анодного струму між великою кількістю метастабільних пітінгів, що зародилися в околі цих оксидів, зниження ступеня некогерентності між суміжними зернами аустеніту внаслідок зменшення їхнього середнього діаметра, а також при зміні кількості дрібних оксидів через зниження середньої відстані між ними.



а



б

Рисунок 5. Зерно аустеніту сталей, що досліджували:

а – 08X18H10 ( $\times 190$ ); б – AISI 321 ( $\times 500$ )

Дослідження пітінготривкості сталей AISI 304 [10] і AISI 321 [9] показали, що вона, в основному, залежить від параметрів модельних оборотних вод ( $x_1$ ,  $x_2$ ), структурної гетерогенності цих сталей ( $x_6$ ,  $x_7$ ) і меншою мірою від вмісту у них Cr у межах стандарту. При цьому результати аналізу (табл. 3, п. 13, 14) та математичної моделі (1) узгоджуються з даними праць [9, 10, 25], тому що встановлено, що  $y(\text{КТП})$  сталей, що досліджуються, практично не змінюється при збільшенні в них вмісту Mn від 1,22 до 1,81 мас.% (табл. 1, 2). Водночас вона зростає на 7,4 °С зі збільшенням у них вмісту Cr від 17,1 до 18,3 мас.% (табл. 1). Пітінготривкість сталей та сплавів, легованих Cr, пов'язують з оксидними плівками, які утворює Cr [25–29]. Крім того, цей елемент впливає на твердофазну дифузію атомів Cr, Ni та Fe до поверхні метастабільних пітінгів та сприяє їх репасивації [24, 25]. При цьому є дані, що Cr [30, 31] і, особливо, марганець [32] підвищують розчинність азоту в корозійнотривких сталях, а, отже, їх пітінготривкість. Опір аустенітних сталей, легованих азотом, до пітінгової корозії пов'язують із збільшенням стабільності оксидної плівки [33].

Механізми поліпшення пасивної стабільності плівок сталей, легованих азотом, включають:

- утворення іонів амонію [33–35] або нітрат (нітрид) іонів [33–37];
- сегрегацію азоту на поверхні при анодному розчиненні [37–41];
- формування на поверхні зв'язків Cr-Ni [42];
- утворення комплексів аміаку або NO [43] та солей амонію.

Крім того вважають [37, 43, 44], що позитивний ефект азоту обумовлений інгібуючою дією на анодне розчинення сталі. Зокрема, є дані [45], що нітрат-іони

стабілізують пасивну плівку, попереджаючи адсорбцію хлоридів і підвищуючи тривкість аустенітних сталей до пітингової корозії в середовищах, що містять хлориди. Слід зазначити, що запропоновані механізми підвищення пітинготривкості сталей за її легування азотом припускають дію азоту, розчиненого в твердому розчині аустеніту сталей. При цьому результати аналізу математичної моделі (1) (табл. 3) показали, що N у кількості 0,011...0,013 мас.% у плавках сталі AISI 321 та 0,032...0,055 мас.% сталі AISI 304 (табл. 1, 2) безпосередньо не впливають на їх  $y$ (КТП), тобто пітинготривкість у модельних оборотних водах. Це пов'язано з його низькою розчинністю в твердому розчині аустеніту сталей. Однак, як згадувалося вище, Cr підвищує його розчинність у твердому розчині. Таким чином азот, розчинений у твердому розчині аустеніту, по одному або декількох з вищезгаданих механізмів захищає аустенітні сталі від пітингової корозії. Таким чином, узагальнюючи вищенаведені дані, можна відзначити, що пітинготривкість аустенітних сталей AISI 304, 08X18H10, AISI 321, 12X18H10T, визначається параметрами оборотних вод (рН( $x_1$ ),  $C_{Cl}$ ( $x_2$ )), складових структури ( $x_4$ ,  $x_5$  – кількість оксидів розміром до 1,98 і 1,98...3,95 мкм, відповідно,  $x_7$  – діаметр зерна аустеніту;  $x_6$ ,  $x_{20}$  – середня відстань між оксидами і нітридами титану, відповідно) сталей та вмістом у них Cr. Інші хімічні елементи в сталях (табл. 1, 2), об'єм оксидів і ніридів титану не впливають на їх  $y$ (КТП) і, відповідно, пітинготривкість.

Слід зазначити, що середньоквадратична помилка визначення  $y$ (КТП) сталей, що досліджували, застосовуючи математичну модель (1) (табл. 3) становить 3820,4 (середнє значення помилки 0,0028). Таким чином, цю математичну модель можна рекомендувати промисловості для прогнозування пітинготривкості теплообмінного обладнання із застосуванням водооборотних систем, а також для вибору плавков цих сталей з оптимальною пітинготривкістю залежно від умов роботи цієї системи. Крім того, розроблена математична модель може бути корисною при розробці нових марок сталей тривких до пітингової корозії.

Розроблена нейронна мережа на основі двошарової нейронної мережі прямого поширення сигналу для скороченого набору вхідних ознак ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_6$ ,  $x_{10}$  і  $x_{12}$ ) (2) дає можливість отримати значно точніше розрахункові значення  $y$ (КТП) для сталей, що досліджували, залежно від параметрів оборотних вод ( $x_1$ ,  $x_2$ ), їх структурного елемента ( $x_6$ ) та хімічних елементів ( $x_{10}$ ,  $x_{12}$ ), ніж математична модель (1). Адже сумарна квадратична помилка для моделі (2) становить 1,7994(3), а середня  $|y_{\text{ек}} - y_{\text{рас}}| = 0,0026$ . При цьому похибка визначення КТП сталей під час експерименту становить  $\pm 0,5$  °C. Недоліком математичної моделі (2) є відсутність можливості оцінити кількісний вплив параметрів модельних оборотних вод, структурної гетерогенності і хімічного складу сталей на їх  $y$ (КТП). Значення вагового коефіцієнта  $j$ -го входу  $i$ -го нейрона першого шару мережі ( $w_j^{(1,i)}$ ) і вагового коефіцієнта  $i$ -го входу єдиного нейрона другого шару мережі ( $w_i^{(2,l)}$ ) представлені в (табл. 4).

**Таблиця 4** – Значення вагових коефіцієнтів  $j$ -го входу  $i$ -го нейрона першого шару мережі ( $w_j^{(1,i)}$ ) та  $i$ -го входу єдиного нейрона другого шару мережі ( $w_i^{(2,l)}$ )

$w_j^{(1,i)}$	$i$	1	2	3	4
$j$	0	-2,5702	-0,0005	0,0019	4,9133
	1 ( $x_1$ )	-1,8387	0,1347	0,2015	-1,9649
	2 ( $x_2$ )	0,7325	0,2347	-0,219	0,065
	6 ( $x_6$ )	-3,5582	11,3589	0,2667	1,5316
	10 ( $x_{10}$ )	-20,461	12,6135	0,1583	0,0165
	12 ( $x_{12}$ )	-20,665	5,4093	0,1532	-0,2049
$i$	0	1	2	3	4
$w_i^{(2,l)}$	-2,3433	17,5420	-1,0258	0,0047	8,3758

Слід зазначити, що у математичній моделі (1), яка ґрунтується на лінійних квадратичних регресіях, значущими є такі змінні  $x_i$ : ( $x_1$ ,  $x_2$  – рН модельних оборотних вод, і концентрація у них хлоридів);  $x_4$ ,  $x_5$  – кількість у сталях, що досліджували, оксидів розміром до 1,98 мкм та від 1,98 до 3,95 мкм;  $x_6$ ,  $x_{20}$  – середня відстань між оксидами та нітридами;  $x_7$  – середній діаметр зерна аустеніту та  $x_{12}$  – вміст хрому в сталях. На нейронній мережі з урахуванням нейронної мережі прямого поширення сигналу для скороченого набору ознак (2): ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_6$ ,  $x_{10}$  і  $x_{12}$ ). У цьому ці ознаки є спільними для обох математичних моделей. Таким чином, виходить, що ці ознаки є найважливішими з точки зору впливу на пітинготривкість сталей. При цьому передбачувані механізми впливу цих ознак на  $y$ (КТП) сталей AISI 304, 08X18H10, AISI 321, 12X18H10T описані вище.

### Висновки

Розроблено дві математичні моделі, що ґрунтуються на лінійних квадратичних регресіях та на нейронній мережі прямого поширення сигналу для скороченого набору ознак. Їх запропоновано використовувати для вибору оптимальних плавков сталей AISI 304, 08X18H10, AISI 321, 12X18H10T та прогнозування пітинготривкості пластинчастих теплообмінників з них в оборотних водах. Встановлено, що їхня пітинготривкість зростає при збільшенні рН оборотної води, кількості оксидів розміром до 3,98 мкм, середньої відстані між нітридами титану, вмісту Cr та зменшенні концентрації хлоридів в оборотній воді, середньої відстані між оксидами та середнього діаметра зерна аустеніту.

На підставі отриманих залежностей та ґрунтуючись на загальновідомих літературних даних запропоновано механізми впливу параметрів оборотних вод, структурних елементів та хімічного складу сталей, що досліджували, на їхню пітинготривкість в оборотній воді. Зокрема, метастабільні пітинги утворюються у твердому розчині аустеніту сталей в околі оксидів (1,98...3,95 мкм) і репасивуються не досягнувши критичних розмірів близько 5 мкм, що сприяє підвищенню їхньої пітинготривкості. Надрібнячи оксиди (до 1 мкм) на перетині з межами зерен аустеніту сприяють утворенню стабільних пітингів, що обумовлено найбільшим ступенем некогерентності суміжних зерен, що

зростає зі збільшенням середнього діаметра зерна аустеніту. Хром сприяє збільшенню розчинності азоту у твердому розчині аустеніту та реласивації пітінгів під дією аніонів сполук азоту.

### Список літератури

1 Хома М. С. Стан і перспективи розвитку досліджень у галузі корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів в Україні (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 27 жовтня 2021 р.) / М. С. Хома // Вісник Національної академії наук України. – 2021. – № 12. – С. 99–106. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2021.12.099>

2. Biehler J. Corrosion properties of polished and shot-peened austenitic stainless steel 304L and 316L with and without plasma nitriding / J. Biehler, H. Hoche, M. Oechsner // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 313. – P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.050>

3. Lochyński P. Corrosion of the chromium-nickel steel screenings and grit separator / P. Lochyński, M. Domańska, K. Kasprzyk // *Ochrona przed Korozją*. – 2019. – Vol. 62(7). – P. 225–235. DOI: <https://doi.org/10.15199/40.2019.7.2>

4. Зингер Н. М. Пластинчатые теплообменники в системах теплоснабжения / Н. М. Зингер, А. М. Тарадай, Л. С. Бармина. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 270 с.

5. Narivs'kyi O. E. Pitting resistance of 06KhN28MDT alloy in chloride-containing media / O. E. Narivs'kyi, S. B. Belikov // *Materials Science*. – 2008. – Vol. 4. – N 44. – P. 573–580.

6. Міщенко, В. Г. Магнетометричні дослідження корозійної поведінки криці AISI 304 у хлоридовмісних середовищах / В. Г. Міщенко, Г. В. Сніжної, О. Е. Нарівський // *Металлофізика та новітні технології*. – 2011. – Т. 33. – № 6. – С. 769–774.

7. Нарівський О. Е. Характерні особливості селективного розчинення сталі AISI 321 в модельних оборотних водах / О. Е. Нарівський, С. Б. Беліков // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2015. – № 1. – С. 24–31.

8. Нарівський О. Е. Кінетика корозійних процесів та швидкість пітінгування сплаву 06ХН28МДТ у слабких хлоридовмісних розчинах / О. Е. Нарівський // *Наукові нотатки. Міжвуз. збір.* – 2011. – № 31. – С. 214–220.

9. Narivskyi O. E. Influence of chloride-containing media on the pitting resistance of AISI 321 steel / O. E. Narivskyi, S. B. Belikov, T. V. Pulina // *Materials Science*. – 2021. – Vol. 57(4). – N 2. – P. 291–297. DOI: [10.1007/s11003-021-00544-z](https://doi.org/10.1007/s11003-021-00544-z)

10. Наривский А. Э. Коррозионные процессы и скорость роста питтингов сталей AISI 304 и 08X18H10 в модельных оборотных водах / А. Э. Наривский, Н. А. Солидор // *Вісник Приазовськ. держ. техн. ун-ту, Сер. техн. науки*. – 2011. – Т. 23. – № 2. – С. 87–97.

11. Freedman D. A. Statistical models: theory and

practice / D. A. Freedman. – Cambridge University Press, 2005. – 458 p.

12. Snizhnoi G. Dependence of corrosion resistance of austenitic chromium-nickel steels on the magnetic state of austenite. *Stainless Steels*. / G. Snizhnoi // London, UK: IntechOpen, 2022. – P. 41–62. DOI: [10.5772/intechopen.102388](https://doi.org/10.5772/intechopen.102388).

13. Snizhnoi V. Determining the role of individual and combined chemical elements in the pitting corrosion process of austenitic Fe-Cr-Ni steels / V. Snizhnoi, G. Snizhnoi, S. Stepanenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. – Vol. 3. – N 12 (117). – P. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.257841>

14. Наривский А. Э. Влияние легирующих элементов и структурной гетерогенности стали ASI321 на селективное растворение металлов из питтингов / А. Э. Наривский Г. Ш. Яр Мухамедова // *Вестник казахского национального университета им. Аль-Фари. Физическая серия*. – 2016. – Т. 56. – № 6. – С. 86–96.

15. Pistorius P. C. Growth of corrosion pits on stainless steel in chloride solution containing dilute sulphate / P. C. Pistorius, G. T. Burstein // *Corrosion Science*. – 1992. – Vol. 33. – N 12. – P. 1885–1897. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90191-5](https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90191-5)

16. Pistorius P. C. Aspects of the effects of electrolyte composition on the occurrence of metastable pitting on stainless steel / P. C. Pistorius, G. T. Burstein // *Corrosion Science*. – 1994. – Vol. 36. – N 3. – P. 525–538. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0010-938X(94)90041-8)

17. Burstein G. T. Cyclic thermammetry / G. T. Burstein, J. J. Moloney // *Electrochemistry Communications*. – 2004. – Vol. 6. – N 10. – P. 1037–1041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.08.006>

18. Leckie H. P. Environmental factors affecting the critical potential for pitting in 18–8 stainless steel / H. P. Leckie, H. H. Uhlig // *Electrochem. Soc.* – 1966. – Vol. 113. – N 12. – P. 1262–1267. DOI: [10.1149/1.2423801](https://doi.org/10.1149/1.2423801)

19. Abd El Meguid, E. A. The effect of some sulphur compounds on the pitting corrosion of type 304 stainless steel / E. A. Abd El Meguid, N.A. Mahmoud, S.S. Abd El Rehim // *Materials chemistry and physics*. – 2000. – Vol. 63. – N 1. – P. 67–74. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00206-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00206-0)

20. Abd El Meguid, E. A. Critical pitting temperature for type 254 SMO stainless steel in chloride solutions / E. A. Abd El Meguid, A. A. Abd El Latif // *Corrosion Science*. – 2007. – Vol. 49. – N 2. – P. 263–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.011>

21. Narivskiy A. E. Determination of pitting resistance steel AISI 304 became in chloride-containing environments which are in work of type heat exchangers / A. E. Narivskiy // *Physicochemical mechanics of materials*. – 2006. – special issue, N 5. – P. 316–320.

22. 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 // *J. Electrochem. Soc.* – 2002. – Vol. 149. – N 2. – P. 34–39. DOI: [10.1149/1.1430415](https://doi.org/10.1149/1.1430415)

23. Определение критического размера питтинга на нержавеющей стали / Л. И. Фрейман, А. Р. Басман, Е. А. Пикус, Л. Е. Гуджабидже // Защита металлов. – 1988. – 24, № 4. – С. 614–617.
24. Снежной Г. В. Влияние суммарного содержания углерода и азота на коррозионное поведение сталей AISI 304 и AISI 321 / Г. В. Снежной // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 8. – С. 95–99.
25. Нарівський О. Е. Закономірності корозійного розчинення та швидкість пітингування сплаву 06ХН28МДТ у нейтральних хлоридовмісних розчинах / О. Е. Нарівський // Наукові нотатки. Міжвуз. збір. – 2011. – № 32. – С. 255 – 261.
26. Нарівський О.Е. Оцінка тривкості сплаву 06ХН28МДТ до пітингової та щільної корозії в хлоридовмісних середовищах / О. Е. Нарівський, С. Б. Беліков // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 2. – С. 45–53.
27. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита сталей. – М. : Металлургия, 1970. – 448 с.
28. Вязовикина Н. В. Использование хроновольтамперометрии для изучения механизма селективного растворения бинарных сплавов хром железо / Н. В. Вязовикина // Электрохимия. – 1992. – № 6. – С. 917–922.
29. Подобаев А. Н. Закономерности анодного растворения Ni-Fe сплавов / А. Н. Подобаев, Л. Э. Джанибахчиева, Я. М. Колотыркин // Электрохимия. – 1996. – № 5. – С. 549–553.
30. Levey, P. R. A mechanistic study of the effects of nitrogen on the corrosion properties of stainless steels / P.R. Levey, A. Van Bennekom // Corrosion. – 1995. – Vol. 51. – N 12. – P. 911–921. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3293567>
31. Gutiérrez de Sainz-Solabarriña, S. Estudio de la susceptibilidad de un acero inoxidable austenítico estabilizado con niobio al dacrado por tenso-corrosión en medio H<sub>2</sub>S (SSC) y corrosión intergranular (IGC) en otros medios agresivos / S. Gutiérrez de Sainz-Solabarriña, J. M. San Juan Nucez // Deformación Metálica. – 1996. – N 226. – P. 77–83.
32. Perren R. A. Microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steels / R. A. Perren, P. J. Uggowitzzer, M. O. Speidel // Duplex Stainless Steels 97. Proceedings, 5th World Conference, 21–23 Jct. – Maastricht, Netherlands, – 1997. –Vol. 1. – 897 p.
33. Osozawa K. Passivity and its breakdown on iron and iron based alloys / K. Osozawa, N. Okato // USA-Japan Seminar on Honolulu, NACE, Houston, Texas. – 1976. – 135 p.
34. Jargelius-Petterson R. F. A. Sensitization behaviour and corrosion resistance of austenitic stainless alloyed with nitrogen and manganese / R. F. A. Jargelius-Petterson // ISIJ International. – 1996. – Vol. 36. – N 7. – P. 818–824. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.818>
35. Jargelius-Petterson R. F. A. Electrochemic investigation of the influence of nitrogen alloying on pitting corrosion of austenitic stainless steels / R. F. A. Jargelius-Petterson // Corrosion Science. – 1999. – Vol. 41. – N 8. – P. 1639–1664. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00013-X)
36. Galvele J. R. Passivity of metals / J. R. Galvele, R. P. Frankenthal, J. Kruger // The Electrochemical Societ. Pennington : NJ. – 1978. – N 28. – P. 285–327.
37. Newman, R. C. A micro-electrode study of the nitrate effect on pitting of stainless steels / R. C. Newman, M. A. Ajjawi // Corrosion Science. – 1986. – Vol. 26. – N 12. – P. 1057–1063. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(86\)90133-2](https://doi.org/10.1016/0010-938X(86)90133-2)
38. Bandy R. Properties of nitrogen-containing stainless alloy designed for high resistance to pitting / R. Bandy, Van Rooyen // Corrosion. – 1985. – Vol. 41. – N 4. – P. 228–233. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3581995>
39. Grabke H. J. The role of nitrogen in the corrosion of iron and steels / H. J. Grabke // ISIJ International. – 1996. – N 36. – P. 777–786.
40. Newman R. C. The effect of alloyed nitrogen or dissolved nitrate ions on the anodic behaviour of austenitic stainless steel in hydrochloric acid / R. C. Newman, T. Shahrabi // Corrosion Science. – 1987. – Vol. 27. – N 8. – P. 827–838. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(87\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0010-938X(87)90040-0)
41. Sadough Vanini A The role of nitrogen in the passivity of austenitic stainless steels / A. Sadough Vanini, J. P. Audouard, P. Marcus // Corrosion Science. – 1994. – Vol. 36. – N 11. – P. 1825–1834. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0010-938X(94)90021-3)
42. Ha, H. Y. Effects of Cr<sub>2</sub>N on the pitting corrosion of high nitrogen stainless steel / H. Y. Ha, H. Kwon // Electrochimica Acta – 2007. – Vol. 52. – N 5. – P. 2175–2180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.08.034>
43. Lu, Y. C. Surface enrichment of nitrogen during passivation of a highly resistant stainless steel / Y. C. Lu, R. Bandy, C. R. Clayton, R. C. Newman / Electrochemical Society. – 1983. – Vol. 130. – N 8. – P. 1774-1776. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2120091>
44. Willenbruch, R. D. An XPS and electrochemical study of the influence of molybdenum and nitrogen on the passivity of austenitic stainless steel / R. D. Willenbruch, C. R. Clayton, M. Oversluizen and etc. // Corrosion Science. – 1990. – Vol. 31. – P. 179–190. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(90\)90106-F](https://doi.org/10.1016/0010-938X(90)90106-F)
45. Newman, R. C. Understanding the corrosion of stainless steel / R. C. Newman // Corrosion. – 2001. – Vol. 57. – N 12. – P. 1030–1041. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3281676>

Одержано 14.03.2023



## MATHEMATICAL MODELING OF THE CORROSION BEHAVIOR OF AUSTENITIC STEELS IN CHLORIDE-CONTAINING ENVIRONMENTS DURING THE OPERATION OF PLATE HEAT EXCHANGERS

- Narivs'kyi O. Dr. Sc., technical director of Ukrspetsmash LLC, Berdyansk, Ukraine, *e-mail: amz309@ukr.net*, ORCID 0000-0002-5608-1474
- Snizhnoi G. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: snow@zp.edu.ua*, ORCID 0000-0003-1452-0544
- 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
- Leoschenko S. assistant of the Department of software tools, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: sedrikleo@gmail.com*, ORCID 0000-0001-5099-5518
- Pulina T. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Management, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: pulinatv@ukr.net*, ORCID 0000-0002-2672-8281
- Snizhnoi V. Ph. D., Associate Professor of, Leading Specialist of the Educational and Scientific Laboratory, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: valentinsnezhnoy@gmail.com*

**Purpose.** It consists in the development of mathematical models that describe the dependence of the critical pitting temperatures of AISI 304, 08X18N10, AISI 321, 12X18N10T steels 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 linear square regression and a neural network of direct signal propagation for a reduced set of features.

**Results.** It was established that the critical pitting temperatures of the studied austenitic chrome-nickel steels increase with an increase in the pH of the circulating water, the number of oxides up to 3.95  $\mu\text{m}$  in size, the average distance between titanium nitrides, the Cr content and a decrease in the concentration of chlorides in the circulating water, the average distance between oxides, and the austenite average grain diameter.

**Scientific novelty.** Based on the established relationships between the critical pitting temperatures of corrosion-resistant steels AISI 304, 08X18H10, AISI 321, 12X18H10T, their chemical composition within the standard and structural heterogeneity, the mechanisms of their influence on the pitting resistance of these structural materials in circulating chloride-containing waters have been developed. It was established that metastable pitting is formed in a solid solution of austenite of steels around oxides with a size of 1,98...3,95 microns and repassivates before reaching critical dimensions of about 5 microns, which contributes to the growth of their pitting resistance in reversible chloride-containing environments.

**Practical value.** The developed mathematical models are proposed to be used for the selection of optimal melts of austenitic chrome-nickel steels for the production of heat exchangers and prediction of their pitting resistance during their operation in circulating waters. The processes contributing to the perforation of heat transfer elements of heat exchangers during their operation have been identified.

**Key words:** plate heat exchangers, circulating water, pitting corrosion, structure, neural networks.

### References

1 Khoma, M.S. (2021). Stan i perspektyvy rozvytku doslidzhen u haluzi korozii ta protykoroziiinoho zakhystu konstruk-tsiinykh materialiv v Ukraini [State and prospects of research development in the field of corrosion and corrosion protection of construction

materials in Ukraine], *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine], 12, 99–106. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2021.12.099>

2. Biehler, J. (2017). Corrosion properties of polished and shot-peened austenitic stainless steel 304L and 316L with and without plasma nitriding, *Surface and*

- coatings technology*, 313, 40–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.050>
3. Lochyński, P. (2019). Corrosion of the chromium-nickel steel screenings and grit separator, *Ochrona przed korozją*, 62(7), 225–235. DOI: <https://doi.org/10.15199/40.2019.7.2>
4. Zynher, N.M., Taradai, A.M., Barmyna, L.S., (1995). *Plastynchatye teploobmenniky v systemakh teplosnabzheniya* [Plate heat exchangers in heating systems]. Moskva, Enerhoatomyzdat. [in Russian].
5. Nariv's'kyi, O.E., Belikov, S.B. (2008). Pitting resistance of 06KhN28MDT alloy in chloride-containing media, *Materials science*, 4(44), 573–580.
6. Mishchenko, V.H., Snizhnoi, H.V., Nariv's'kyi, O.E. (2011). Mahnetometrychni doslidzhennia korozii noi povedinky krytsi AISI 304 u khlorydovmisnykh seredovyshchakh [Magnetometric investigation of corrosion behavior of AISI 304 steel in chloride-containing environment], *Metallofizika i noveishie tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies], 33(6), 769–774. [in Ukrainian].
7. Nariv's'kyi, O.E., Bielikov, S.B. (2015). Kharakterni osoblyvosti selektyvnoho rozchynennia stali AISI 321 v modelnykh oborotnykh vodakh [Characteristic features of selective dissolution of AISI 321 steel in model circulating waters], *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni* [New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering], 1, 24–31. [in Ukrainian].
8. Nariv's'kyi, O.E. (2011). Kinytyka koroziiynykh protsesiv ta shvydkist pitynhuvannia splavu 06KhN28MDT u slabokyslykh khlorydovmisnykh rozchynakh [Kinetics of corrosion processes and speed of pitting of the 06KhN28MDT alloy in weakly acidic chloride-containing solutions], *Naukovi notatky* [Scientific notes], 31, 214–220. [in Ukrainian].
9. Nariv's'kyi, O.E., Belikov, S.B., Pulina, T.V. (2021). Influence of chloride-containing media on the pitting resistance of AISI 321 steel, *Materials Science*, 57(4), 2, 291–297. DOI: [10.1007/s11003-021-00544-z](https://doi.org/10.1007/s11003-021-00544-z)
10. Narivskij, A.E., Solidor, N.A. (2011). Korrozionnye processy i skorost rosta pittingov stalej AISI 304 i 08H18N10 v modelnykh oborotnykh vodah [Corrosion processes and growth rate of AISI 304 and 08X18H10 steel pits in model circulating waters], *Visnyk Pryazovsk. derzh. tekhn. un., Ser. tekhn. nauky* [Reporter of the Priazovskyi ntechnical university. Section: Technical sciences], 23, 2, 87–97. [in Russian].
11. Freedman, D.A. (2005). *Statistical models: theory and practice*, Cambridge University Press.
12. Snizhnoi, G. (2022). Dependence of Corrosion Resistance of Austenitic Chromium-Nickel Steels on the Magnetic State of Austenite, *Stainless Steels*. London, UK: IntechOpen, pp. 41-62, DOI: [10.5772/intechopen.102388](https://doi.org/10.5772/intechopen.102388).
13. Snizhnoi, V., Snizhnoi, G., Stepanenko, S. (2022). Determining the role of individual and combined chemical elements in the pitting corrosion process of austenitic Fe-Cr-Ni steels, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12), 117, 13–19. DOI: <https://doi.org/10.15588/1729-4061.2022.257841>
14. Narivskij, A.E., Yar Muhamedova, G.Sh. (2016). Vliyanie legiruyushih elementov i strukturnoj geterogennosti stali ASI321 na selektivnoe rastvorenje metallov iz pittingov [Effect of Alloying Elements and Structural Heterogeneity of Steel ASI321 on Selective Dissolution of Metals from Pittings], *Vesnik kazahskogo nacionalnogo universiteta im. Al-Fari. Fizicheskaya seriya* [Bulletin of the Kazakh National University named after Al-Fari. Physical Series], 56(6), 86–96. [in Russian].
15. Pistorius, P.C., Burstein, G.T. (1992). Growth of corrosion pits on stainless steel in chloride solution containing dilute sulphate, *Corrosion Science*, 33(12), 1885–1897. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90191-5](https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90191-5)
16. Pistorious, P.C., Burstein, G.T. (1994). Aspects of the effects of electrolyte composition on the occurrence of metastable pitting on stainless steel, *Corrosion Science*, 36(3), 525–538. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0010-938X(94)90041-8)
17. Burstein, G.T., Moloney, J.J. (2004). Cyclic thermammetry, *Electrochemistry Communications*, 6(10), 1037–1041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.08.006>
18. Leckie, H.P., Uhlig, H.H. (1966). Environmental factors affecting the critical potential for pitting in 18–8 stainless steel, *Electrochem. Soc.*, 113(12), 1262–1267. DOI: [10.1149/1.2423801](https://doi.org/10.1149/1.2423801)
19. Abd El Meguid, E.A., Mahmoud, N.A., Abd El Rehim, S.S. (2000). The effect of some sulphur compounds on the pitting corrosion of type 304 stainless steel, *Materials chemistry and physics*, 63(1), 67–74. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00206-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00206-0)
20. Abd El Meguid, E.A., Abd El Latif, A.A. (2007). Critical pitting temperature for type 254 SMO stainless steel in chloride solutions, *Corrosion Science*, 49(2), 263–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.011>
21. Narivskiy, A. E. (2006). Determination of pitting resistance steel AISI 304 became in chloride-constaining enviroments which are in work of type heat exchangers, *Physicochemical mechanics of materials (special issue)*, 5, 316–320.
22. Park, J.O., Matsch, S., Bohni, H. (2002). Effects of temperature and chloride concentration on pit initiation and early pit growth of stainless steel, *J. Electrochem. Soc.*, 149(2), 34–39. DOI: [10.1149/1.1430415](https://doi.org/10.1149/1.1430415)
23. Freiman, L.Y., Basman, A.R., Pykus, E.A., Hudzhabydzhe, L. E. (1988). Opredefenye krytycheskoho razmera pyttynha na nerzhaveiushchei staly [Determination of the critical size of pitting on stainless steel], *Zashchyta metallov* [Metal protection], 24(4), 614–617. [in Russian].
24. Snezhnoi, H.V. (2016). Vlyianye summarnoho soderzhanyia uhleroda y azota na korrozionnoe povedenye stalei AISI 304 y AISI 321 [Influence of the total content of carbon and nitrogen on the corrosion behavior of AISI 304 and AISI 321 steels], *Avyatyyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohiya* [Aerospace

- Engineering and Technology], 8, 95–99. [in Russian].
25. Narivskiy, O.E. (2011). Zakonomirnosti korozijnogo rozchynennia ta shvydkist pitynhuvannia splavu 06KhN28MDT u neitralnykh khloridovymisnykh rozchynakh [Patterns of corrosion dissolution and speed of pitting of the 06KHN28MDT alloy in neutral chlorine-containing solutions], *Naukovi notatky* [Scientific notes], 32, 255–261. [in Ukrainian].
26. Narivskiy, O.E., Bielikov, S.B. (2007). Otsinka tryvkosti splavu 06KhN28MDT do pitynhovoi ta shchilynnoi korozii v khloridovymisnykh seredovyschakh [Evaluation of the durability of the 06KHN28MDT alloy to pitting and crevice corrosion in chloride-containing environments], *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni* [New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering], 2, 45–53. [in Ukrainian].
27. Rozenfeld, Y. L. (1970). Korroziiya y zashchyta stalei. Moskva, Metallurhiya. [in Russian].
28. Vyazovikina, N.V. (1992). Ispolzovanie hronovoltamperometrii dlya izucheniya mehanizma selektivnogo rastvoreniya binarnykh splavov hrom zhelezo [The use of chronovoltamperometry to study the mechanism of selective dissolution of binary chromium-iron alloys], *Elektrohimiya* [Electrochemistry], 6, 917–922. [in Russian].
29. APodobaev, N., Dzhanibachieva, L.E., Kolotyркиn, Ya.M. (1996). Zakonomernosti anodnogo rastvoreniya Ni-Fe splavov [Regularities of anodic dissolution of Ni-Fe alloys], *Elektrohimiya* [Electrochemistry], 5, 549–553. [in Russian].
30. Levey, P.R., Van Bennekom, A. (1995). A mechanistic study of the effects of nitrogen on the corrosion properties of stainless steels, *Corrosion*, 51(12), 911–921. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3293567>
31. Gutiérrez de Sónz-Solabarriña, S., San Juan Nucez, J.M. (1996). Estudio de la susceptibilidad de un acero inoxidable austenítico estabilizado con niobio al dacadado por tensocorrosión en medio H<sub>2</sub>S (SSC) y corrosión intergranular (IGC) en otros medios agresivos, *Deformaciyn Metólica*, 226, 77–83.
32. Perren, R.A., Uggowitzer, P.J., Speidel, M.O. (1997). Microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steels, *Duplex Stainless Steels 97. Proceedings, 5th World Conference, 21–23 Jct. Maastricht, Netherlands*, 1, 897.
33. Osozawa, K., Okato, N. (1976). Passivity and its breakdown on iron and iron based alloys, *USA-Japan Seminar on Honolulu. NACE, Houston, Texas*, 135.
34. Jargelius-Petterson, R.F.A. (1996). Sensitization behaviour and corrosion resistance of austenitic stainless alloyed with nitrogen and manganese, *ISIJ International*, 36(7), 818–824. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.818>
35. Jargelius-Petterson, R.F.A. (1999). Electrochemic investigation of the influence of nitrogen alloying on pitting corrosion of austenitic stainless steels, *Corrosion Science*, 41(8), 1639–1664. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00013-X)
36. Galvele, J.R., Frankenthal, R.P., Kruger, J. (1978). Passivity of metals, *The Electrochemical Societ. Pennington: NJ*, 28, 285–327.
37. Newman, R.C., Ajjawi, M.A.A. (1986). A micro-electrode study of the nitrate effect on pitting of stainless steels, *Corrosion Science*, 26(12), 1057–1063. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(86\)90133-2](https://doi.org/10.1016/0010-938X(86)90133-2)
38. Bandy R., Van Rooyen, D. (1985). Properties of nitrogen-containing stainless alloy designed for high resistance to pitting, *Corrosion*, 41(4), 228–233. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3581995>
39. Grabke, H.J., (1996). The role of nitrogen in the corrosion of iron and steels, *ISIJ international*, 36, 777–786.
40. Newman, R.C., Shahrabi, T. (1987). The effect of alloyed nitrogen or dissolved nitrate ions on the anodic behaviour of austenitic stainless steel in hydrochloric acid, *Corrosion Science*, 27(8), 827–838. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(87\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0010-938X(87)90040-0)
41. Sadough Vanini, A., JAudouard, P., Marcus, P. (1994). The role of nitrogen in the passivity of austenitic stainless steels, *Corrosion Science*, 36(11), 1825–1834. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0010-938X(94)90021-3)
42. Ha, H.Y., Kwon, H. (2007). Effects of Cr<sub>2</sub>N on the pitting corrosion of high nitrogen stainless steel, *Electrochimica Acta*, 52(5), 2175–2180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.08.034>
43. Lu, Y. C., Bandy, R., Clayton, C.R., Newman, R.C. (1983). Surface enrichment of nitrogen during passivation of a highly resistant stainless steel, *Electrochemical Society*, vol. 130, no. 8, pp. 1774-1776, DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2120091>
44. Willenbruch, R.D., Clayton, C.R., Oversluizen, M., Kim, D., Lu, Y. (1990). An XPS and electrochemical study of the influence of molybdenum and nitrogen on the passivity of austenitic stainless steel, *Corrosion Science*, 31, 179–190. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(90\)90106-F](https://doi.org/10.1016/0010-938X(90)90106-F)
45. Newman, R. C. (2001). Understanding the corrosion of stainless steel, *Corrosion*, 57(12), 1030–1041. DOI: <https://doi.org/10.5006/1.3281676>