

МОДЕЛЮВАННЯ ПІТИНГУВАННЯ ТЕПЛООБМІННИКІВ ЗІ СТАЛЕЙ ТИПУ 18/10 В ОБОРОТНИХ ВОДАХ

О. Е. НАРІВСЬКИЙ¹, С. О. СУББОТІН², Т. В. ПУЛІНА²,
С. Д. ЛЕОЩЕНКО², М. С. ХОМА³, Н. Б. РАЦЬКА³

¹ ТОВ "Укрспецмаш", Бердянськ;

² Національний університет "Запорізька політехніка";

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Розроблено математичні моделі, які описують залежності критичних температур пітингування сталей 12X18H10T, 08X18H10, AISI304 і AISI321 в модельних оборотних водах з рН 4...8 і концентрацією хлоридів 350...600 mg/l від хімічного складу і структури. Вони ґрунтуються на багатомірних регресіях першого порядку та на нейронних мережах прямого розповсюдження сигналу. З аналізу математичних моделей встановлено, що критичні температури пітингування цих сталей ростуть зі збільшенням рН оборотних вод та зменшенням концентрації хлоридів, середньої відстані між оксидами і нітридами титану та кількості найдрібніших (до 1,98 μm) оксидів. При цьому виявлено, що вплив концентрації хлоридів в оборотних водах та структурної гетерогенності сталей найсуттєвіший, а їх хімічного вмісту в межах стандарту – відсутній. Запропоновано розроблені математичні моделі застосовувати для вибору оптимальних за пітинготривкістю плавок сталей типу 18/10 та її прогнозування під час експлуатації теплообмінників в оборотних водах.

Ключові слова: *пітинготривкість, корозійнотривкі сталі, модельні оборотні води, хлориди, структурна гетерогенність, теплообмінник.*

Mathematical models have been developed that describe the dependences of critical pitting temperatures of 12X18H10T, 08X18H10, AISI304 and AISI321 steels in model circulating waters with pH 4...8 and chloride concentration 350...600 mg/l on chemical composition and structure. They are based on multidimensional regressions of the first order and on neural networks of direct signal propagation. The analysis of mathematical models shows that the critical pitting temperatures of these steels increase with increasing pH of circulating waters and decreasing chloride concentration, the average distance between oxides and nitrides of titanium and the number of the smallest (up to 1.98 μm) oxides. It is found that the influence of chloride concentration in circulating waters and the above-mentioned indicators of steel structure is the most significant, and of their chemical composition within the standard is absent. It is proposed to use the developed mathematical models to select the optimal melting of steels of type 18/10 according to their pitting resistance and its prediction during the operation of heat exchangers in circulating waters.

Keywords: *pitting resistance, corrosion-resistant steels, model circulating waters, chlorides, structural heterogeneity, heat exchanger.*

Вступ. Сталі 12X18H10T, 08X18H10, AISI304 і AISI321 використовують для виробництва теплообмінників через їх високу корозійну тривкість у багатьох технологічних середовищах [1, 2]. Однак вони можуть піддаватися пітинговій корозії під час експлуатації теплообмінників із застосуванням оборотної води [3–5]. Для оцінювання та прогнозування пітинготривкості теплообмінників зі сталей 08X18H10, AISI304 побудували математичні моделі залежності їх критичної тем-

ператери пітингування (КТП) від хімічного складу, структури та параметрів оборотних вод, застосовуючи багатомірну лінійну регресію першого порядку [6–9], а для сталей AISI321 та 12X18H10T ще й на нейронних мережах прямого розповсюдження сигналу [10, 11]. Розроблені математичні моделі показали, що пітинготривкість сталей типу 18/10 залежить здебільшого від їх структурної гетерогенності, вмісту хрому у них та параметрів оборотної води. Тому математичні моделі залежності КТП цих сталей від їх хімічного складу, структури та параметрів оборотної води викликають як практичний інтерес для вибору оптимальної марки сталі та її плавки, так і теоретичний для розроблення нових марок сталей тривких до пітингової корозії у низькомінералізованих хлоридовмісних середовищах, якими є оборотні води. Тому нижче, ґрунтуючись на сучасних уявленнях про пітингову корозію та застосовуючи лінійну регресію і нейромережеву модель, яка базується на основі двошарової нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу, встановили взаємозв'язок між КТП сталей типу 18/10 та їх хімічним складом, структурою і параметрами оборотної води.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували по п'ять промислових плавок сталей AISI304, AISI321 і по одній 12X18H10T та 08X18H10 (табл. 1). Їх хімічний склад і структурну гетерогенність визначали раніше [4, 5].

Таблиця 1. Хімічний склад сталей

№ плавки	Вміст елементів, mass%								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	N	Ti	S	P
	AISI304								
1	0,017	1,24	0,22	17,96	9,34	0,048	–	0,001	0,027
2	0,067	1,74	0,50	18,22	8,09	0,046	–	0,001	0,028
3	0,075	1,65	0,43	18,25	8,09	0,055	–	0,004	0,024
4	0,050	1,70	0,41	18,30	8,10	0,044	–	0,002	0,028
5	0,030	1,81	0,39	18,10	8,20	0,039	–	0,001	0,034
08X18H10	0,060	1,34	0,32	17,44	9,77	–	–	0,006	0,035
	AISI321								
1	0,035	1,66	0,54	17,10	9,10	0,012	0,32	0,001	0,034
2	0,066	1,59	0,66	16,43	9,14	0,011	0,34	0,002	0,027
3	0,064	1,22	0,52	17,43	9,70	0,012	0,41	0,001	0,032
4	0,030	1,62	0,41	17,41	9,24	0,013	0,31	0,002	0,029
5	0,040	1,70	0,49	17,70	9,10	0,013	0,35	0,001	0,028
12X18H10T	0,070	1,70	0,49	17,97	10,46	–	0,46	0,007	0,027

Математичні моделі залежності КТП сталей від їх хімічного складу, структури та параметрів оборотних вод будували, застосовуючи лінійну регресію першого порядку [12] у вигляді

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

де y^s – значення вихідної ознаки для s -го спостереження вибірки (КТП); N – кількість ознак, що характеризують вибірку; S – об'єм вибірки; W_j – вага j -ої ознаки; x_j^s – значення j -ої ознаки s -го екземпляра вибірки.

Зокрема, вихідною ознакою моделі (1) є КТП сталі в модельних оборотних водах, а ознаки s -го екземпляра вибірки x_j^s такі: показники модельних оборотних вод (x_1 – рН, x_2 – вміст хлоридів, mg/l), складники структури сталей (x_3 – об'єм оксидів, vol.%; x_4, x_5 – кількість оксидів розміром до 1,98 μm та від 1,98 до 3,95 μm на 100 pixels у полі зору мікроскопа ($\times 320$); x_6 – середня відстань між оксидами, μm ; x_7 – середній діаметр зерна аустеніту, μm ; x_8 – об'єм δ -фериту, vol.%; x_{19} – нітридів титану, vol.%; x_{20} – середня відстань між нітридами, μm), їх хімічний склад у межах стандарту (x_9 – вміст вуглецю, mass%, 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 магнетна сприйнятливість, m^3/kg .

Нейромережеву модель на основі двошарової мережі прямого розповсюдження сигналу можна описати формулою

$$y = W_0^{(2,1)} + \sum_{i=1}^{15} W_i^{(2,1)} \cdot \Pi^{(1,i)} \left[W_0^{(1,i)} + \sum_{j=1}^7 W_j^{(1,i)} \cdot x_j^{(1,i)} \right], \quad (2)$$

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

$W_j^{(1,i)}$ – ваговий коефіцієнт j -го входу нейрона першого шару мережі; $W_i^{(2,1)}$ – ваговий коефіцієнт i -го входу єдиного нейрона другого шару мережі.

Якість математичних моделей оцінювали за додатком квадратів миттєвих помилок [12]

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

де y^{s*} – розрахункове значення вихідної ознаки для s -го екземпляра спостереження (КТП). Коефіцієнти багатомірної лінійної регресії визначали методом найменших квадратів [12].

Результати та їх обговорення. Згідно з моделлю, КТП досліджуваних сталей зростає зі збільшенням рН модельної оборотної води, об'єму δ -фериту в сталі, вмісту хрому і нікелю, питомої магнетної сприйнятливості та зменшенням вмісту хлоридів в оборотній воді, об'єму і кількості оксидів усіх розмірів у сталі, середньої відстані між ними, середнього діаметра зерна аустеніту, вмісту марганцю в сталі і середньої відстані між нітридами:

$$\begin{aligned} y(\text{КТП}) = & 1,7217x_1 - 0,0639x_2 - 0,0698x_3 - 0,0294x_4 - 0,0056x_5 - \\ & - 0,0230x_6 - 0,0099x_7 + 0,0003x_8 - 0,0059x_{10} + 0,663x_{12} + \\ & + 0,3713x_{13} + 40,7445x_{18} - 0,1224x_{20}. \end{aligned} \quad (4)$$

Сумарна середня квадратична похибка $y(\text{КТП})$ становить 4637,7°C, а середня – 0,0031°C. Згідно з моделлю (4), враховуючи параметри досліджених сталей та хлоридовмісного середовища [4, 5], їх КТП суттєво зростає зі збільшенням рН (x_1) модельних оборотних вод (6,9°C) та зниженням у них концентрації хлоридів x_2 (C_{Cl^-}) (16°C), кількості найдрібніших оксидів у сталях розміром до 1,98 μm

(12,1°C), середньої відстані між оксидами незалежно від їх розміру (14,8°C) та нітридами титану (11,1°C) (табл. 2).

Слід відзначити, що вміст вуглецю (x_9), кремнію (x_{11}), азоту (x_{14}), титану (x_{15}), сірки (x_{16}), фосфору (x_{17}) та об'єм нітридів титану (x_{15}) у досліджуваних сталях не впливають на їх КТП в модельних оборотних водах (4). Також результати показують, що хімічний склад сталей та навіть вміст у них шкідливих домішок не діють на їх пітинготривкість у цьому середовищі, при цьому структурна гетерогенність сталей та параметри оборотних вод її визначають. Зокрема, інтенсивність їх впливу на КТП можна подати у такому ряду: рН модельних оборотних вод (6,9°C), середня відстань між нітридами титану в сталях (11,1°C), кількість найдрібніших оксидів до 1,98 μm (12,1°C), середня відстань між оксидами (14,8°C), концентрація хлоридів (16,0°C). Така тенденція узгоджується з багатьма відомими дослідженнями для корозійнотривких сталей і сплавів. Зокрема, в працях [13–18] встановлено, що ΔE – критерій, який визначають за різницею потенціалів пітингування та вільної корозії, знижується з підвищенням температури розчинів та вмісту хлоридів. До того ж за результатами праці [19], що більша концентрація хлоридів у розчині, то інтенсивніше руйнуються оксидні плівки над метастабільними пітингами, сприяючи переходу решти у стабільний стан за нижчої температури. Таку тенденцію виявили раніше [20], але її пов'язували з адсорбційними процесами. Отримані тут результати підтверджують гіпотезу Розенфельда, оскільки збільшення вмісту хлоридів у модельних оборотних водах найсильніше зменшує КТП досліджуваних сталей. Водночас вона також достатньо швидко знижується зі збільшенням середньої відстані між оксидами та нітридами. При цьому природа включень має значення, оскільки КТП сталей в 1,33 рази інтенсивніше знижується зі зростанням середньої відстані між оксидами і нітридами, в околі яких зароджуються пітинги. Згідно з отриманими залежностями, що більша середня відстань між включеннями, то вони крупніші і за нижчої температури зароджуються пітинги в їх околі. Це пов'язано з ростом дефектності структури аустеніту в околі включень через збільшення їх розмірів, а отже, підвищення адсорбції хлоридів на цих ділянках. Крім того, ймовірність пітингової корозії досліджених сталей тісно пов'язана з кількістю дрібних до 1,98 μm оксидів, оскільки, що їх більше, то нижча КТП. Це зумовлено підвищенням вірогідності перетину дрібних оксидів з межами зерен аустеніту, де зароджуються пітинги, що також пов'язано з густиною дефектів структури на цих ділянках та з інтенсифікацією адсорбції хлоридів на них. До того ж, як встановлено раніше [21], на пітингоутворення впливає інтенсивна твердофазна дифузія атомів основних металів на дефектах структури. Слід зазначити, що в працях [22, 23] пов'язують можливість пітингової корозії сталей з критичними розмірами включень, в околі яких зароджуються стабільні пітинги, що також зумовлено дефектністю аустеніту на цих ділянках та адсорбцією хлорид-йонів.

Таким чином, узагальнюючи вищенаведене, можна зазначити, що пітинготривкість сталей типу 18/10 залежить від параметрів модельних оборотних вод та структурної гетерогенності і це пов'язано з інтенсивною адсорбцією хлорид-йонів на недосконалостях структури аустеніту в околі оксидів, нітридів та найдрібніших оксидів на перетині з межами зерен аустеніту.

Грунтуючись на результатах (табл. 3), виробникам теплообмінників рекомендовано використовувати сталі типу 18/10 з мінімальною кількістю дрібних (1,98 μm) оксидів (до 100 одиниць) на 100 pixels у полі зору мікроскопа ($\times 320$) із середньою відстанню між оксидами до 300 μm та нітридами титану до 45 μm . Для оцінки пітинготривкості теплообмінників під час їх експлуатації ефективніше використовувати модель (2).

Розроблена нейромережева модель (2) на основі двошарової нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу дає можливість точніше визначати пітинготривкість сталей типу 18/10 залежно від зміни їх параметрів ($x_3...x_{20}$) та модельних оборотних вод (рН (x_1) і $C_{Cl-}(x_2)$).

Таблиця 2. Вплив на КТП параметрів сталей та модельних оборотних вод

Параметри	Діапазон досліджень	Вплив параметра на КТП	КТП сталей залежно від параметра, °C
рН (x_1)	4...8	↑	6,9
Об'єм δ -фериту (x_8), vol. %	$(138...3720) \cdot 10^{-4}$	↑	~ 0
Вміст Cr (x_{12}), mass%	16,43...18,30	↑	1,2
Вміст Ni (x_{13}), mass%	8,09...10,46	↑	0,9
Відносна магнетна сприйнятливність χ (x_{18}), m ³ /kg	$(2,23...2,31) \cdot 10^{-8}$	↑	~ 0
Концентрація хлоридів $C_{Cl-}(x_2)$, mg/l	350...600	↓	16,0
Об'єм оксидів $V_{ox}(x_3)$, vol. %	$(65...324) \cdot 10^{-4}$	↓	~ 0
Кількість оксидів розміром до 1,98 μm $N(x_4)$	12...425	↓	12,1
Кількість оксидів розміром від 1,98 до 3,95 μm $N(x_5)$	46...240	↓	1,6
Середня відстань між оксидами $L_{ox}(x_6)$, μm	150...794	↓	14,8
Середній діаметр зерна аустеніту $d_3(x_7)$, μm	49...312	↓	2,9
Вміст Mn (x_{10}), mass%	1,22...1,74	↓	~ 0
Середня відстань між нітридами титану $L_{TiN}(x_{20})$, μm	0...91	↓	11,1

Середнє значення похибки КТП сталей цього типу, визначених розрахунком (2) із використанням вагових коефіцієнтів j -го входу нейрона першого шару мережі та j -го входу єдиного нейрона другого шару мережі (табл. 2) становить 0,0064°C, а сумарна середня квадратична похибка – 2,1598°C, що суттєво нижче за середнє квадратичне відхилення КТП сталей під час експерименту та розраховане за моделлю (4). Тому для прогнозування пітиноготривкості сталей 12X18H10T, 08X18H10, AISI304 і AISI321 під час експлуатації теплообмінників в оборотних водах рекомендовано використовувати модель (2), а для вибору оптимальної за пітинготривкістю плавки – модель (4).

Таблиця 3. Вагові коефіцієнти j -го входу i -го нейрона першого шару мережі та i -го входу єдиного нейрона другого шару мережі

$W_j^{(1,i)}$	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
j	0	-15,1528	-0,0669	0,3069	6,438	0,973	15,667	0,4273	1,2191	6,2983	-0,2126
	1(x_1)	13,7836	7,2047	-0,8126	2,5268	10,7624	8,1242	0,2300	0,3329	-2,6401	0,6156
	2(x_2)	-0,0317	18,3090	1,8497	4,0516	-30,2512	-0,0169	-1,9990	-0,3129	-4,1895	1,5507
	3(x_3)	-1,5200	4,2343	1,3796	0,3215	4,4718	-0,7081	-0,4980	-0,1771	0,4344	-1,7040
	4(x_4)	-3,5029	-7,5901	-0,4556	-0,6763	10,4546	-1,8538	0,8735	-0,0237	0,4721	0,9500
	5(x_5)	-0,7271	1,2306	0,4411	2,9273	-4,6730	0,0024	-1,7935	0,4333	-2,8730	-1,8267
	6(x_6)	0,1442	-2,8536	-1,7000	1,3902	-10,6005	-0,7569	-0,5537	0,3938	-0,9755	0,5903
	7(x_7)	2,0849	-1,023	4,9117	1,9576	10,2422	3,8874	0,1060	-1,4482	-1,8271	-0,0562
	8(x_8)	0,3116	11,0903	1,1752	-2,4001	4,3190	0,7497	-2,0267	0,1159	1,0709	-0,6581
	9(x_9)	-0,1535	-6,3493	-1,1035	0,2418	11,0128	-0,9733	-1,2933	0,2585	-0,6401	-4,2206
	10(x_{10})	0,6769	4,6454	1,6039	0,5788	12,6600	1,1820	2,0352	-0,4004	0,2416	-2,2471
	11(x_{11})	-0,0882	-1,1041	-1,6848	1,9206	-7,6440	-1,5992	-6,6352	0,0048	-1,8481	-0,6815
	12(x_{12})	-0,3235	2,1793	5,7244	1,2237	-14,3248	2,1190	-1,6032	-0,2838	-1,4581	-0,3862
	13(x_{13})	0,6793	-0,1619	-2,2112	-0,4949	15,9670	1,0084	3,8073	-0,3461	0,9966	-1,1629
	14(x_{14})	0,2284	6,5958	-2,8549	-2,8923	-3,5988	-1,2810	2,5317	-0,1544	2,4705	1,1062
	15(x_{15})	3,0757	6,7342	1,1184	-0,0916	-3,0223	2,2234	0,1770	-0,5226	0,3480	0,3986
	16(x_{16})	-1,9726	-5,3333	2,4298	-0,6264	1,8400	-0,7618	-3,0790	-0,1156	0,1927	1,2471
	17(x_{17})	-2,2093	-7,7792	-3,0379	1,1597	7,6632	-1,0990	0,0310	0,1971	-1,7857	0,9238
	18(x_{18})	-1,1947	-7,8974	0,5316	-0,3336	-1,9098	-0,6414	0,4391	-0,3266	0,1755	1,4742
	19(x_{19})	1,2761	5,3074	-2,1338	-1,6320	5,5936	-0,5587	-2,6691	0,5261	1,2312	1,5453
	20(x_{20})	2,8050	4,1246	1,5566	-0,5166	1,7813	2,9304	1,2855	0,0989	0,5228	0,3899
i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_i^{(2,i)}$	-0,2451	0,4761	5,7903	1,4738	-3,7375	8,1902	0,1814	-3,041	0,4233	3,8024	3,6906

ВИСНОВКИ

Розроблено дві математичні моделі, які ґрунтуються на багатомірних лінійних регресіях першого порядку та на нейронних мережах прямого розповсюдження сигналу. Їх запропоновано для вибору оптимальних за пітинготривкістю плавков сталей типу 18/10 та прогнозування пітиноготривкості теплообмінників з цих сталей в оборотних водах. Встановлено, що вона зростає зі збільшенням рН оборотної води і зменшенням кількості найдрібніших оксидів, вмісту хлоридів, середньої відстані між оксидами та нітридами.

1. *Туфганов Д. Г.* Коррозионная стойкость нержавеющей сталей: Справ. – М.: Металлургия, 1990. – 320 с.
2. *Muraleedharan P., Granamorthy I. B., and Rodriguez P.* Comparativ study: degree of sensitization and intergranular stress corrosion cracking susceptibility of Type 304 stainless steel // *Corr.* – 1996. – **52**, № 10. – P. 790–800.
3. *Narivs'kyi O. E.* Corrosion fracture of platelike heat exchangers // *Materials Science.* – 2005. – **41**, № 1. – P. 122–128.
4. *Narivs'kyi O. E.* Influence of the heterogeneity of AISI321 steel on its pitting in chloride containing media // *Materials Science.* – 2007. – **43**, № 2. – P. 256–264.
5. *Mishchenko V. G., Snighnoi G. V., and Narivskyi O. Eh.* Magnetometric investigations of corrosion behaviour AISI304 steel in chloride conbaing environment // *Metallofizika I No-veishie Tehnologii.* – 2011. – **33**, № 6. – P. 769–774.
6. *Оцінювання та прогнозування пітинготривкості пластинчастих теплообмінників зі сталі AISI304 під час їх експлуатації в оборотних водах / О. Е. Нарівський, С. О. Суботін, Т. В. Пуліна, М. С. Хома // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2022. – **58**, № 1. – С. 41–46.
7. *Вязовикина Н. В.* Использование хромовольтамперометрии для изучения механизма селективного растворения бинарных сплавов хром-железо // *Электрохимия.* – 1992. – № 6. – С. 917–922.
8. *Подобаев А. Н., Джанибахчиева Л. Э., Колотыркин Я. М.* Закономерности анодного растворения Ni–Fe сплавов // *Электрохимия.* – 1996. – № 5. – С. 549–553.
9. *Haykin S. O.* Neutral Networks and Learning Machines. – London: Pearson, 2008. – 936 p.
10. *Герасимов В. В.* Прогнозирование коррозии металлов. – М.: Металлургия, 1989. – 151 с.
11. *Influence of chloride-containing media on the pitting resistance of AISI321 steel / О. Е. Narivskyi, S. B. Belikov, S. A. Subbotin, and T. V. Pulina // Materials Science.* – 2021. – **57**, № 2. – P. 291–297.
12. *Frudman D. A.* Statistical Model: Theory and prectice. – Cambridge University Rress., 2005. – 458 p.
13. *Burstein G. T. and Moloney J. J.* Cyclic thamammetry // *Electrochem. Commun.* – 2004. – **6**. – P. 441–446.
14. *Tsutsumi Y., Nishikata A., and Tsuru N.* Pitting corrosion mechnism of type 304 stainless steel under adriplet of chloride solutions // *Corr. Sci.* – 2007. – **49**, № 3. – P. 1394–1407.
15. *Leckie Y. P. and Cehlig H. H.* Environmental factors affecting the critical for pitting in18–8 stainless steel // *J. Electrochem. Soc.* – 1966. – **113**, № 12. – P. 1262–1267.
16. *Abd EL. Megnid E. A., Mahmoud N. A., and Abd EL. Rehim.* The effect of some sulphur compouunds on the pitiing corrosion of type 304 stainless steel // *Mat. Chem. Phys.* – 2000. – № 63. – P. 67–74.
17. *Abd EL. Megnid E. A. and Abd EL Latif A. A.* Critical pitting temperature for type 254 SMO stainless stell in chloride solution // *Corr. Sci.* – 2007. – № 49. – P. 263–275.
18. *Newman R. C.* 2001 W. R. Whiney award lecture: understanding the corrotion of stainless steel // *Corr.* – 2001. – **57**, № 12. – P. 1030–1041.
19. *Laycock N. S., Moyed M. H., and Newman R. C.* Metastable pitting and the critical pitting temperature // *J. Electrochem. Soc.* – 1998. – **145**, № 8. – P. 2622–2628.
20. *Розенфельд И. Л.* Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 448 с.
21. *Нарівський О. Е., Бєліков С. Б.* Характерні особливості селективного розчинення сталі AISI321 в модельних оборотних водах // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2015. – № 1. – С. 24–31.
22. *Park J. O., Matsch S., and Bohni H.* Effects of temperature on pit initiation and early pit growth of stainless steel // *J. Electrochem. Soc.* – 2002. – **149**, № 2. – P. 34–39.
23. *Определение критического размера питинга на нержавеющей стали / Л. И. Фрейман, А. Р. Басман, Е. А. Пикус, Л. Е. Гуджбанидзе // Защита металлов.* – 1988. – **24**, № 4. – С. 614–617.

Одержано 26.09.2022