ВПЛИВ ХЛОРИДОВМІСНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПІТИНГОТРИВКІСТЬ СТАЛІ AISI 321

О. Е. НАРІВСЬКИЙ [1], *С. Б. БЄЛІКОВ* [2], *С. О. СУББОТІН* [2], *Т. В. ПУЛІНА* [2]

[1] *ТОВ "Укрспецмаш", Бердянськ;*

[2] *Національний університет "Запорізька політехніка"*

Розроблено математичні моделі, які описують залежності критичних температур пітингування сталі AISI 321 в модельних оборотних водах з pH 4…8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 mg/l від хімічного складу та структури. Вони ґрунтуються на багатомірних лінійних регресіях першого порядку та на нейронних мережах прямого розповсюдження сигналу. Застосовуючи розроблені математичні моделі, встановили, що критичні температури пітингування сталі AISI 321 ростуть зі збільшенням pH оборотної води, середньої відстані між оксидами в сталі, вмісту в ній марганцю і хрому та зменшенням середнього діаметра зерна аустеніту та вмісту хлоридів у середовищі. Водночас виявлено, що вплив середовища найсуттєвіший, але гетерогенність сталі, яка залежить від вмісту в ній Cr, Si, Mn і N, також сильно впливає на її пітинготривкість. Запропоновано розроблені математичні моделі застосовувати для вибору оптимальних плавок сталі AISI 321, найтривкіших до пітингування в модельних оборотних водах.

Ключові слова: *пітинготривкість, теплообмінник, оборотна вода, структурна гетерогенність, хімічний склад, прогнозування пітинготривкості.*

Mathematical models that describe the dependences of the critical temperatures of AISI 321 steel pitting in model circulating waters with a pH of 4...8 and a chloride concentration of 350 to 600 mg/l on its chemical composition and structure have been developed. They are based on multidimensional linear regressions of the first order and on neural networks of direct signal propagation. Using the developed mathematical models, it is found that the critical pitting temperatures of AISI 321 steel increase with increasing pH of the circulating water, the average distance between the oxides in the steel, the content of manganese and chromium in it, and a decrease in the average grain diameter of austenite and the content of chlorides in the medium. At the same time, it is found that the influence of environmental parameters is the greatest, but the heterogeneity of steel, depending on the content of Cr, Si, Mn i N in it, also significantly affects its pitting resistance. It is proposed to use the developed mathematical models to select the optimal melts of AISI 321 steel, the most resistant to pitting in model circulating waters.

Keywords: *pitting resistance, heat exchanger, circulating water, structural heterogeneity, chemical composition, pitting resistance prediction.*

Вступ. У виробництві теплообмінної апаратури використовують сталь AISI 321 [1], але вона, як і решта сталей типу 18-10, може піддаватися пітингуванню в оборотних хлоридовмісних водах [2, 3]. Найчастіше пітинготривкість сталей оцінюють електрохімічними методами в хлоридовмісних розчинах підвищених концентрацій [4–6]. Однак оборотні води для теплообмінників є низькомінералізовані з концентрацією хлоридів від 350 до 600 mg/l [3], тому ці методи прогнозування пітинготривкості сталі технічно важко використовувати в умовах промислових виробництв.

Контактна особа: О. Е. НАРІВСЬКИЙ, e-mail: amz309@ukr.net

У низькомінералізованих хлоридовмісних середовищах пітинготривкість сталей і сплавів визначають за критичною температурою пітингування (КТП). Зокрема, в працях [7–10] між КТП сталей та їх параметрами встановлено регресійні залежності для прогнозування пітинготривкості в модельних оборотних водах, але вони не враховують синергетичний вплив середовища і параметрів сталі. До того ж значущість параметрів сталі у цих залежностях не встановлювали через недостатню кількість експериментів. Тому мета роботи – побудувати математичні моделі, застосовуючи багатомірні лінійні регресії різних порядків та нейронні мережі прямого розповсюдження сигналу, та на їх підставі проаналізувати вплив середовища і параметрів сталі на її пітинготривкість у модельних оборотних водах.

Матеріали та методика дослідження. Досліджували п’ять промислових плавок сталі AISI 321. Їх КТП та хімічний склад і структурну гетерогенність визначали раніше [1, 7]. За основу побудови математичних моделей використовували багатомірні лінійні регресії різних порядків [11] та нейронні мережі прямого розповсюдження сигналу [12].

Багатомірна лінійна регресія першого порядку [11] має такий вигляд:

$$y^s = \sum_{j=1}^{N} w_j x_j^s, \quad s = 1,\ 2,\ ...,\ S, \tag{1}$$

де y^s – значення вихідної ознаки для s-го спостереження вибірки (КТП); w_j – вага j-ої ознаки; x_j^s – значення j-ої ознаки s-го екземпляра вибірки, зокрема: x_1 – pH оборотної води; x_2 – вміст хлоридів у ній, mg/l; x_3 – об’єм нітридів титану в сталі (V_{TiN}), vol.%; x_4 – середня відстань між ними (L_{TiN}), μm; x_5 – об’єм оксидів у сталі (V_{ox}), vol.%; x_6 – середня відстань між ними (L_{ox}), μm; x_7 – середній діаметр зерна аустеніту (d_3), μm; x_8 – вміст C у сталі, mass%; x_9 – вміст Mn у сталі, mass%; x_{10} – вміст Si у сталі, mass%; x_{11} – вміст Cr у сталі, mass%; x_{12} – вміст Ni у сталі, mass%; x_{13} – вміст Ti у сталі, mass%; x_{14} – вміст N у сталі, mass%; x_{15} – вміст S у сталі, mass%; x_{16} – вміст P у сталі, mass%; x_{17} – об’єм δ-фериту у сталі (P_α), vol.%; N – кількість ознак; S – об’єм (кількість екземплярів) вибірки.

Прямоспрямовану нейронну мережу з одним виходом [11] можна описати формулою

$$y^{(\eta,i)} = \psi^{(\eta,i)}\left(w_0^{(\eta,i)} + \sum_{j=1}^{N_\mu} w_j^{(\eta,i)} x_j^{(\eta,i)} \right),\ \eta = 1,\ 2,\ ...,\ N_\mu;\ \ i = 1, 2,..., N_{\mu-1}, N_0 = N, \tag{2}$$

де $y^{(\eta,\, i)}$ – значення на виході i-го нейрона j-го шару нейромережі; $\psi^{(\eta,i)}$ – функція активації i-го нейрона η-го шару нейромережі; $w^{(\eta,\, i)}$ – ваговий коефіцієнт i-го нейрона η-го шару; $x_j^{(\eta,\, j)}$ – значення на j-му вході i-го нейрона η-го шару мережі; N_η – кількість нейронів у η-му шарі мережі.

Щоб оцінити якість синтезованих модулів, використовували додаток квадратів миттєвих похибок [11, 12]

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

де y^s – фактичне значення вихідної ознаки для s-го спостереження навчальної вибірки; y^{s*} – розрахункове значення вихідної ознаки спостереження навчальної вибірки.

Для визначення коефіцієнтів лінійних регресійних моделей застосували метод найменших квадратів [11], а для побудови нейромоделей – метод Левенберга–Марквартда [13] та розрахунок приватних похідних на основі методу зворотного розповсюдження похибки [12].

Результати дослідження та їх обговорення. Аналіз розробленої лінійної регресійної моделі (1) показав, що в модельних оборотних водах з pH 4…8 і концентрацією хлоридів 350, 400, 500, 550 і 600 mg/l КТП сталі AISI 321 зростає зі збільшенням pH (x_1) хлоридовмісного середовища, середньої відстані між нітридами титану L_{TiN} (x_4), середньої відстані між оксидами алюмінію L_{ox} (x_6), вмісту Mn (x_9) і Cr (x_{11}) та зі зниженням концентрації хлоридів Cl^- (x_2) і середнього діаметра зерна аустеніту в сталі d_3 (x_7):

$$КТП\ (y) = 3{,}228x_1 - 0{,}074828x_2 + 0{,}16033x_4 + 0{,}01786x_6 - 0{,}038583x_7 + \\ + 2{,}1261x_{10} + 3{,}7309x_{12}. \quad (4)$$

Слід відзначити, що сумарна середня похибка КТП, визначена за виразом (4), становить 1,8°C, а сумарна квадратична – 662,9°C. Такі результати дають можливість застосовувати (4) для прогнозування пітинготривкості різних плавок сталі AISI 321 у модельних оборотних водах з pH 4…8 і вмістом Cl^- від 350 до 600 mg/l. Аналіз рівняння (4) та результатів [7] показав, що підвищення pH модельних оборотних вод від 4 до 8 і зниження в них концентрації хлоридів від 600 до 350 mg/l сприяє росту КТП сталі на 12,9 і 17,6°C, відповідно. Водночас показники структурної гетерогенності сталі L_{TiN} (x_4), L_{ox} (x_6) і d_3 (x_7) суттєво менше впливають на її КТП (y): збільшення середньої відстані між нітридами титану L_{TiN} (x_4) від 66 до 91 μm, оксидами алюмінію від 280 до 431 μm і зниження середнього діаметра зерна аустеніту d_3 (x_7) від 312 до 196 μm підвищує КТП на 4; 2,7 і 4,4°C.

Слід відзначити, що середня відстань між нітридами титану L_{TiN} (x_4) і оксидами алюмінію L_{ox} (x_6) характеризує їх розміри. Зокрема, що вона більша, то крупніші ці включення і, відповідно, вища пітинготривкість сталі. Встановлено [1, 7], що на КТП сталі AISI 321 впливає об'єм нітридів титану V_{TiN} (x_3) і оксидів алюмінію V_{ox} (x_5). При цьому вона за лінійною залежністю зростає зі зниженням у сталі V_{TiN} (x_3) і V_{ox} (x_5). Але ці залежності [1, 7] не враховують синергетичний вплив оборотних вод та решти параметрів сталі. Слід відзначити, що розроблена модель не має цього недоліку, оскільки параметри L_{TiN} (x_4); L_{ox} (x_6) і d_3 (x_7) сталі та pH (x_1) і концентрація Cl^- (x_2) модельних оборотних вод значущі. Отже, вважаючи, що параметри V_{TiN} (x_3) і V_{ox} (x_5) несуттєві, можна припустити, що вплив нітридів титану і оксидів алюмінію на пітинготривкість сталі AISI 321 не пов'язаний з її електрохімічними показниками у модельних оборотних водах. Найвірогідніше вплив включень на пітинготривкість сталі пов'язаний з їх геометричними параметрами, зокрема, що крупніші ці включення, то нижчий ступінь некогерентності між суміжними атомами та аустенітною матрицею в їх околі. Це сприяє росту КТП і пітинготривкості сталі AISI 321. Ця гіпотеза ґрунтується на результатах праці [7], де встановлено, що в аналогічних умовах випробувань нітриди титану > 12 μm не брали участь у пітингуванні сталі, а активність включень розміром від 8 до 12 μm утричі нижча, ніж від 2 до 8 μm. Такі дані узгоджуються з результатами [14], де стабільні пітинги на сталі типу 18-10 фіксували в околі включень, які не менші 5 μm. За рівнянням (4) нітриди титану на порядок інтенсивніше сприяють росту КТП (y) сталі, ніж оксиди зі збільшенням середньої відстані між ними (L_{TiN}, L_{ox}). Враховуючи дані [1], можна припустити, що це пов'язано з їх розмірами, формою і природою. Водночас таку ж тенденцію виявлено в праці [7], оскільки показано, що коефіцієнти зв'язку пітингів з нітридами титану на порядок менші, ніж з оксидами.

Згідно з виразом (4), збільшення середнього діаметра зерна аустеніту d_3 (x_7) сприяє зниженню КТП (y) сталі AISI 321. Найвірогідніше, що вище d_3, то менша ймовірність перетину меж зерен аустеніту із включеннями. Через це менша кількість пітингів утворюється на одиниці поверхні сталі. При цьому відомо [15], що за меншої кількості пітингів на одиниці поверхні сталі встановлюється вища гус-

тина анодних струмів. Це може сприяти переходу метастабільних пітингів у стабільні. Адже в працях [1, 16] йдеться, що за досягнення критичного значення потенціалів і, відповідно, струмів на анодних ділянках сталі, змінюється напрямок твердофазної дифузії атомів Cr, Fe і Ni. Слід відзначити, що для сталі AISI 304 в аналогічних модельних оборотних водах встановлено протилежні закономірності між КТП і d_3 [17]. Це, найвірогідніше, зумовлено суттєвою різницею їх параметрів d_3 і кількістю та розмірами включень. Водночас після випробувань сталей AISI 321, AISI 304 і сплаву 06ХН28МДТ за методом ДУ ГОСТ 6032-89 між їх корозійними втратами Δm_i та структурною гетерогенністю також встановлено прямопропорційні залежності. Зокрема, виявлено, що після чотирьох з п'яти циклів випробувань Δm_i сталі AISI 321 зростають зі збільшення середньої відстані між включеннями. Це пов'язано з витравленням включень з аустенітної матриці. До того ж, що вони більші, то вищі Δm_i сталі, але менші корозійні пошкодження меж зерен аустеніту. Таке можна пояснити перерозподілом анодних струмів в околі включень і межами зерен аустеніту. Отже, незалежно від корозивної активності середовища, кількість включень та їх розміри сильно впливають на перерозподіл анодних струмів, зокрема і в пітингах. Це може впливати на характер твердофазної дифузії основних елементів сталі (Cr, Ni і Fe) та переходу метастабільних пітингів у стабільні, що безпосередньо підтверджує вищевказану гіпотезу про механізми впливу d_3 і включень у сталі AISI 321 на її пітинготривкість.

Згідно з рівнянням (4), КТП сталі AISI 321 підвищується зі збільшенням у ній вмісту Cr (x_{11}) і Mn (x_9). Зокрема, на 10°C зі зростанням вмісту Mn від 1,22 до 1,7 mass% і на 4,7°C зі збільшенням вмісту Cr від 16,43 до 17,7 mass%. Максимально можливий вміст Cr у сталі AISI 321 – 19 mass%. Отже, зростання її КТП може становити 9,6°C, що можна порівняти з впливом pH (x_1) і Cl^- (x_2) на пітинготривкість сталі.

Пітинготривкість сталей і сплавів, легованих Cr, пов'язують з оксидними плівками, які утворює Cr з O [2, 3, 15, 18, 19]. Водночас цей елемент впливає на твердофазну дифузію атомів Cr, Ni і Fe до поверхні метастабільних пітингів та сприяє їх репасивації [20, 21].

Можна узагальнити, що в модельних оборотних водах на пітинготривкість сталі AISI 321 здебільшого впливають вміст Cr у ній та pH середовища і концентрація у ньому Cl^-. Вплив нітридів титану значно нижчий, але його варто враховувати під час вибору оптимальної плавки сталі.

Розроблена модель на основі двошарової нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу дає можливість точніше визначати пітинготривкість сталі AISI 321 залежно від зміни її параметрів, зокрема L_{TiN} (x_4), L_{ox} (x_6), d_3 (x_7), Mn (x_9), Cr (x_{11}), та модельних оборотних вод (pH (x_1) та концентрація Cl^- (x_2)):

$$\text{КТП}(y) = w_0^{(2,1)} + \sum_{i=1}^{15} w_i^{(2,1)} \psi^{(1,i)} \left(w_0^{(1,i)} + \sum_{j=1}^{7} w_j^{(1,i)} x_j^{(1,i)} \right), \qquad (5)$$

де $\psi^{(1,i)}(a) = \dfrac{2}{1+e^{-2a}} - 1$ – 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 (див. таблицю).

Середнє значення похибки КТП сталі AISI 321, визначеної розрахунком (5), становить 0,08°C, а сумарна квадратична – 2,16, що суттєво нижче за середнє значення похибки встановленої КТП сталі під час експерименту. Тому для прогнозування пітинготривкості сталі AISI 321 під час експлуатації теплообмінників в оборотних водах рекомендовано використовувати модель (5), а для вибору оптимальної за пітинготривкістю плавки – модель (4).

Вагові коефіцієнти *j*-го входу *i*-го нейрона другого шару мережі моделі на основі двошарової нейронної мережі прямого розповсюдження сигналу

$w_j^{(1,i)}$	*j*								*i*	$w_i^{(2,1)}$
i	0	1 (x_1)	2 (x_2)	3 (x_4)	4 (x_6)	5 (x_7)	6 (x_{10})	7 (x_{12})	0	–1,7900
1	6,8503	–9,8069	–0,3636	–4,9572	3,3499	4,0264	–1,2982	8,6463	1	–1,6921
2	2,4786	–0,0820	1,0546	1,4357	–1,4375	–2,0242	–2,5178	1,3872	2	9,3631
3	3,0824	–1,5590	–4,4740	–2,4564	2,6468	3,4934	–1,0090	2,6641	3	0,7046
4	–3,6965	8,4871	8,9202	–1,3262	–4,8690	7,1635	2,6216	–2,3052	4	–0,2334
5	2,1984	10,2768	–13,1303	–4,3703	10,5007	–3,1618	6,9186	4,8144	5	0,1491
6	–0,5557	–0,6742	–0,7286	0,5711	–0,4269	–0,3200	–0,8047	–0,2804	6	–3,0800
7	7,9383	–10,2441	0,2052	4,9496	11,3267	4,3056	–4,4800	3,2544	7	–0,0991
8	0,4149	3,2222	0,8215	1,1624	3,5260	0,3810	0,9712	–0,6450	8	–1,2592
9	3,1952	8,2977	11,4121	4,4668	–8,9635	3,1563	–0,5811	–4,2289	9	0,3680
10	0,3389	0,8693	1,4879	0,1073	0,0427	–0,7717	0,5216	0,1816	10	–1,1612
11	2,3488	1,6859	2,7455	–1,3028	1,5774	1,0158	–0,0008	2,4809	11	–0,8740
12	–1,8273	0,1225	–0,9806	–2,2571	2,0927	2,7792	0,2628	0,1696	12	8,7939
13	2,9453	–1,6947	–3,5650	0,3187	–0,0172	–1,0461	–0,9197	1,5125	13	–0,4477
14	–2,4285	–2,6580	–0,5920	–1,5841	–2,0349	–0,6325	2,0215	–1,3870	14	–1,3949
15	4,7583	–1,7114	–2,4547	–1,6973	0,0952	–0,1332	0,7698	2,2776	15	1,4054

Аналіз коефіцієнтів парної кореляції між параметрами модельних оборотних вод та сталі AISI 321 показав, що pH (x_1) модельних оборотних вод і концентрація в них хлоридів Cl^- (x_2) не залежать від параметрів сталі. Проте V_{TiN} (x_3) залежить від d_3 (x_7), вмісту Si (x_{10}), Cr (x_{11}), N (x_{14}), оскільки коефіцієнти прямолінійної кореляції становлять 0,75; 0,7; –0,6; –0,68. Це зумовлено тим, що карбідотвірні елементи, зокрема Si, Cr та N визначають об'єм карбонітридів V_{TiN} (x_3) у сталі. Водночас кореляцію між V_{TiN} (x_3) та d_3 (x_7) можна пов'язати з тим, що стабільні пітинги на поверхні сталі AISI 321 утворюються в околі нітридів титану на перетині з межами зерен аустеніту з середнім діаметром d_3 (x_7). Слід відзначити, що нітриди титану в сталі також характеризуються середньою відстанню між ними L_{TiN} (x_4), яка корелює за прямолінійною залежністю з L_{ox} (x_6), P_α (x_{17}), Si (x_{10}), Cr (x_{11}), N (x_{14}), S (x_{15}), оскільки коефіцієнти прямолінійної кореляції між ними відповідно становлять: –0,59; 0,75; 0,68; –0,84; –0,87; 0,52.

ВИСНОВКИ

Розроблено дві математичні моделі, які ґрунтуються на багатомірних лінійних регресіях першого порядку та на нейронних мережах прямого розповсюдження сигналу. Їх запропоновано використовувати для вибору оптимальної плавки сталі AISI 321 та прогнозування пітинготривкості теплообмінників з цієї сталі в оборотних водах. Встановлено, що її пітинготривкість росте зі збільшенням pH оборотної води, середньої відстані між оксидами в сталі, вмісту в ній марганцю і хрому та зменшенням середнього діаметра зерна аустеніту та вмісту хлоридів у середовищі. Вплив середовища найсуттєвіший, однак, гетерогенність сталі, яка залежить від вмісту в ній Cr, Si, Mn і N, також суттєво впливає на її пітинготривкість в оборотних водах.

1. *Нарівський О. Е.* Закономірності і механізми локальної корозії корозійнотривких сталей і сплаву аустенітного класу для ємнісної та теплообмінної апаратури: авторефер. дис. д-ра техн. наук: 05.17.14. – Львів, 2015. – 42 с.

2. *Нарівський О. Е.* Мікромеханізм корозійного руйнування пластин теплообмінників // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 1. – С. 110–116.
(*Narivs'kyi O. E.* Micromechanism of corrosion fracture of the plate sofheatex changers // Materials Science. – 2007. – **43**, № 1. – P. 124–132.)
3. *Нарівський О. Е.* Корозійне руйнування пластинчастих теплообмінників // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 1. – С. 104–108.
(*Narivs'kyi O. E.* Corrosion fracture of platelike heat exchangers // Materials Science. – 2005. – **41**, № 1. – P. 122–128.)
4. *Web E. G. and Alkire R. C.* Pit initiation at single sulfide inclusion in stainless steel. II. Detection of local pH, sulfide and thiosulfate // J. of Electrochem. Soc. – 2002. – № 149. – P. 280–285.
5. *Pitting* corrosion behavior of austenitic stainless steel-combining effects of Mn and Mo additions / A. Pardo, M. C. Mirono, A. E. Goy, F. Viejo, R. Arrabal, and E. Matydinal // Corr. Sci. – 2008. – № 50. – P. 1796–1806.
6. *The composition* on the boundary region of Mn, S inclusions in stainless steel and its relevance in triggering pitting corrosion / P. Schmuki, H. Hildebrand, A. Friendrich, S. Vistanen // Corr. Sci. – 2005. – № 47. – P. 1239–1250.
7. *Нарівський О. Е.* Вплив гетерогенності сталі AISI 321 на її пітингування у хлоридовмісному середовищі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 2. – С. 100–106.
(*Narivs'kyi O. E.* Influence of the heterogeneity AISI 321 on its pitting in chloride-containing media // Materials Science. – 2007. – **43**, № 2. – P. 256–264.)
8. *Нарівський О. Е.* Кінетика корозійних процесів та швидкість пітінгування сплаву 06ХН28НДТ у слабокислих хлоридовмісних середовищах // Наукові нотатки. – 2011. – Вип. № 31. – С. 214–220.
9. *Нарівський О. Е.* Закономірності корозійного розчинення та швидкість пітінгування сплаву 06ХН28НДТ у нейтральних хлоридовмісних розчинах // Наук. нотатки. – 2011. – Вип. № 32. – С. 255–261.
10. *Нарівський О. Е., Бєліков С. Б.* Пітінготривкість сплаву 06ХН28МДТ у хлоридовмісних середовищах // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 4. – С. 95–101.
(*Narivs'kyi O. E. and Belikov S. B.* Pitting resistance of 06KHN28MDT alloy in chloride-containing media // Materials Science. – 2008. – **44**, № 4. – P. 573–580.)
11. *Freedman D. A.* Statistical Models: theory and practice. – Cambridge University Press, 2005. – 458 p.
12. *Haykin S. O.* Neutral Networks and Learning Machines. – London: Pearson, 2008. – 936 p.
13. *Nocedal J. and Wright. S.* Numerical Optimization. – New York: Springer-Verlag, 2006. – 664 p.
14. *Определение* критического радиуса питтинга на нержавеющей стали / Л. И. Фрейман, А. Р. Бисман, Е. Л. Пикус, Л. Е. Гуджабидзе // Защита металлов. – 1988. – **24**, № 4. – С. 614–617.
15. *Розенфельд И. Л.* Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 448 с.
16. *Нарівський А. Е., Бєліков С. Б.* Характерні особливості селективного розчинення сталі AISI 321 в модельних оборотних водах // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 1. – С. 24–31.
17. *Наривский А. Э., Солидор Н. А.* Коррозионные процессы и скорость роста питтингов сталей AISI 304 и 08Х18Н10Т в модельных оборотных водах // Вестник Приазовск. гос. техн. ун-та. Сер. техн. науки. – 2011 – **23**, № 2. – С. 87–96.
18. *Вязовикина Н. В.* Использование хромовольтамперометрии для изучения механизма селективного растворения бинарных сплавов хром–железо // Электрохимия. – 1992. – № 6. – С. 917–922.
19. *Подобаев А. Н., Джанибахчиева Л. Э, Колотыркин Я. М.* Закономерности анодного растворения Ni–Fe сплавов // Электрохимия. – 1996. – № 5. – С. 549–553.
20. *Narivs'kiy A. E. and Yar-Mukhamedova G. Sh.* Influence alloying elements and steel AISI 321 structural heterogeneity on the selective dissolution of metals frompitting // Kaz. NU Buletion. Physics series. – 2016. – № 1. – P. 86–97.
21. *Бєліков С. Б., Нарівський О. Е., Хома М. С.* Пітінгова корозія теплообмінників в оборотних водах та її прогнозування. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2019. – 216 с.

Одержано 07.04.2020