

УДК 537.622.3:620.193.4:669.15

ВПЛИВ ПИТОМОЇ МАГНЕТНОЇ СПРИЙНЯТЛИВОСТІ СТАЛЕЙ AISI 304 ТА 08X18H10 НА ЇХ ГРАНИЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ В ХЛОРИДОВІСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

О. Е. НАРІВСЬКИЙ¹, Г. В. СНИЖНОЙ², Т. В. ПУЛИНА²,
В. Л. СНИЖНОЙ³, Н. А. СОЛДОР⁴

¹ ТОВ "Укрспецмаш", Бердянськ;

² Національний університет "Запорізька політехніка";

³ Запорізький національний університет;

⁴ ДВНЗ "Приазовський державний технічний університет", Дніпро

Потенціодинамічними методами досліджено тривкість сталей AISI 304 і 08X18H10 до щілинної корозії в хлоридовмісних середовищах. Встановлено ширину зазору (0,3 mm) між зразком і контртілом як модель між суміжними пластинами пластинчатих теплообмінників. За площами петлі гістерезису побудованих анодних потенціодинамічних кривих прямого і зворотного ходу порівняно об'єм локальних пошкод від щілинної корозії досліджуваних сталей. Максимальні площі петлі гістерезису сталей та об'єм локальних корозійних пошкод встановлено в плавках з найменшими ($2,23 \cdot 10^{-8}$ і $2,24 \cdot 10^{-8}$ м³/kg) та найбільшим ($2,31 \cdot 10^{-8}$ м³/kg) значеннями питомої парамагнетної сприйнятливості χ_0 аустеніту. Виявлено, що потенціал вільної корозії $E_{\text{сонт}}$ сталей інтенсивно зсувається у від'ємний (від $-0,28$ до $-0,41$ V), а репасивації $E_{\text{р}}$ і щілинної корозії $E_{\text{сrev}}$ – у додатний бік (від $-0,38$ до $-0,29$ V і від $-0,1$ до $0,1$ V) відповідно зі збільшенням параметра χ_0 від $2,23 \cdot 10^{-8}$ до $2,25 \cdot 10^{-8}$ м³/kg, що сприяє зростанню їх ΔE -критерію в щілині від $0,02$ до $0,69$ V та опору щілинній корозії. Це зумовлено тим, що в цьому інтервалі значень ΔE зміну χ_0 визначають вмістом C, N, S, P і Cr у твердому розчині аустеніту сталей. Показано, що зі збільшенням параметра χ_0 сталей до $2,31 \cdot 10^{-8}$ м³/kg їх потенціал $E_{\text{сонт}}$ зсувається у додатний від $-0,41$ до $-0,32$, а $E_{\text{р}}$, $E_{\text{сrev}}$ у від'ємний бік від $0,29$ до $-0,15$ і від $0,1$ до $-0,02$ V відповідно, що сприяє зниженню ΔE -критерію сталей від $0,65$ до $0,14$ V та їх опору щілинній корозії. Параметр χ_0 сталей є інтегральною характеристикою парамагнетного стану аустеніту і його можна застосовувати для оцінювання опору щілинній корозії в хлоридовмісних середовищах.

Ключові слова: щілинна корозія, аустеніт, питома магнетна сприйнятливість, структурна гетерогенність, граничні потенціали, хлоридовмісне середовище.

The resistance of AISI 304 and 08X18H10 steels to crevice corrosion in chloride-containing media was studied using potential-dynamic methods. The preset gap width of 0.3 mm between the sample and the counter body simulates the gap between adjacent plates of plate like heat exchangers. The area of the hysteresis loop of the constructed anode potential-dynamic curves of the forward and reverse stroke was used to compare the volume of local damage caused by crevice corrosion of the studied steels. The maximum areas of the steel hysteresis loop and the volume of local corrosion damage in the ingots with the lowest ($2.23 \cdot 10^{-8}$ and $2.24 \cdot 10^{-8}$ m³/kg) and highest ($2.31 \cdot 10^{-8}$ m³/kg) values of the specific paramagnetic susceptibility χ_0 of austenite have been established. It is found that the free corrosion potential $E_{\text{сонт}}$ of steels intensively shifts in the negative direction (from -0.28 up to -0.41), and the repassivation $E_{\text{р}}$ and crevice corrosion $E_{\text{сrev}}$ – in the positive direction from -0.38 up to -0.29 and from -0.1 to 0.1 V, respectively, with an increase in the parameter χ_0 from $2.23 \cdot 10^{-8}$

up to $2.25 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, which contributes to an increase in their ΔE -criterion from 0.02 up to 0.69 V and resistance to crevice corrosion. This is due to the fact that in this range of values, the change in the χ_0 parameter is determined by deviations in the content of C, N, S, P and Cr in the solid solution of austenite in steels. It is shown that with an increase in the parameter χ_0 of steels to $2.31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, their potential E_{corr} shifts in the positive direction from -0.41 up to -0.32 , and E_{rp} , E_{crev} – in the negative direction from 0.29 up to 0.15 and from 0.10 up to -0.02 V, respectively, which contributes to a decrease in the ΔE criterion of steels from 0.65 up to 0.14 V and their resistance to crevice corrosion. The χ_0 parameter of steels is an integral characteristic of the paramagnetic state of austenite and can be used to assess their resistance to crevice corrosion in chloride-containing media.

Keywords: crevice corrosion, austenite, specific magnetic susceptibility, structural heterogeneity, repassivation potentials, chloride-containing media.

Вступ. Часто для визначення тривкості корозійноотривких сталей і сплавів до щільної корозії використовують електрохімічні методи, які полягають у встановленні граничних потенціалів, за яких діє локальна корозія. Це потенціали щільної корозії (E_{crev}) та репасивації (E_{rp}). Для додаткової характеристики опору щільній корозії сталей і сплавів використовують додаткові показники – базиси їх тривкості до локальної корозії. Їх визначають за різницею між потенціалами E_{rp} або E_{crev} та потенціалом корозії E_{corr} . Опір щільній корозії тим вище, що більше значення цих базисів [1, 2]. Відомо [3, 4], що концентрація хлоридів у хлоридовмісному розчині комплексно впливає на тривкість корозійноотривких сталей і сплавів до локальної корозії. Зокрема, дослідження [5–8] показали, що за сталої температури потенціал пітингування (E_{pit}) пропорційно зсувається у від’ємний бік зі збільшенням логарифма концентрації хлоридів у розчині. Водночас ΔE -критерій, який визначають за різницею потенціалів пітингування E_{pit} та вільної корозії E_{corr} , знижується з підвищенням температури розчину та вмісту хлоридів [9]. Встановлено, що більше Cr у сталях і сплавах аустенітного класу загалом [10, 11] та сталі AISI 304 зокрема [12], то вище їх пітинготривкість у хлоридовмісних середовищах, яку визначали за критичними температурами пітингування (КТП). Водночас виявлено [13–19], що структурна гетерогенність цих сталей і сплавів більше впливає на їх пітинготривкість у таких середовищах, ніж вміст Cr, але суттєво менше за pH і концентрацію хлоридів у середовищах. Питома парамагнетна сприйнятливості χ_0 аустеніту є інтегральною характеристикою сталей і сплавів [20, 21], тому для оцінки тривкості сталі AISI 304 до локальної корозії в хлоридовмісних середовищах визначали її вплив на граничні потенціали (E_{crev} , E_{rp}) та базиси ΔE їх опору щільній корозії.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували п’ять промислових плавок сталі AISI 304 і одну 08X18H10. Їх хімічний склад, структурну гетерогенність визначали раніше [14]. Питому парамагнетну сприйнятливості χ_0 аустеніту і вміст δ -фериту в сталях AISI 304, 08X18H10 встановлено у працях [20, 21]. Електрохімічні випробування сталей здійснювали на зразках, вирізаних уздовж вальцювання листів завтовшки 1 mm. Поліровані зразки $30 \times 20 \times 1 \text{ mm}$ з отвором $\varnothing 6 \text{ mm}$ збирали у пакети. Зазор між зразком і контртілом, які зроблені з однакових матеріалів (див. таблицю), фіксували фторопластовими шайбами – він становив 0,3 mm, що відповідає зазору між суміжними пластинами пластинчатого теплообмінника.

Досліджували на потенціостаті П5848. Перед поляризацією зразки 10 min витримували у розчині 3% NaCl до встановлення потенціалу вільної корозії E_{corr} та анодно поляризували зі швидкістю 1,8 V/h. Потенціодинамічні анодні криві прямого ходу знімали до густини струму 30 mA/cm^2 , зворотні криві – до мінімальних катодних струмів ($0,005 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$). Похибка визначення потенціалів щільної корозії E_{crev} та репасивації E_{rp} у щільності не перевищувала $\pm 0,01 \text{ V}$.

Хімічний склад сталей AISI 304 (плавки 1–5) і 08X18H10, mass%

Сталь, плавка	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti	N
AISI 304, пл. 1	0,071	1,23	0,22	0,001	0,027	17,96	9,34	0,003	0,048
AISI 304, пл. 2	0,067	1,74	0,5	0,001	0,028	18,22	8,09	0,003	0,046
AISI 304, пл. 3	0,075	1,65	0,43	0,004	0,024	18,25	8,09	0,003	0,055
AISI 304, пл. 4	0,05	1,7	0,41	0,002	0,028	18,3	8,1	0,003	0,044
AISI 304, пл. 5	0,03	1,81	0,39	0,001	0,034	18,1	8,2	0,003	0,039
08X18H10, пл. 6	0,06	1,34	0,32	0,006	0,035	17,44	9,77	0,03	–

Результати та їх обговорення. Аналіз побудованих потенціодинамічних кривих прямого та зворотного ходу показав (рис. 1), що площа петлі гістерезису зростає так: пл. 1–3, пл. 6, пл. 5, 4.

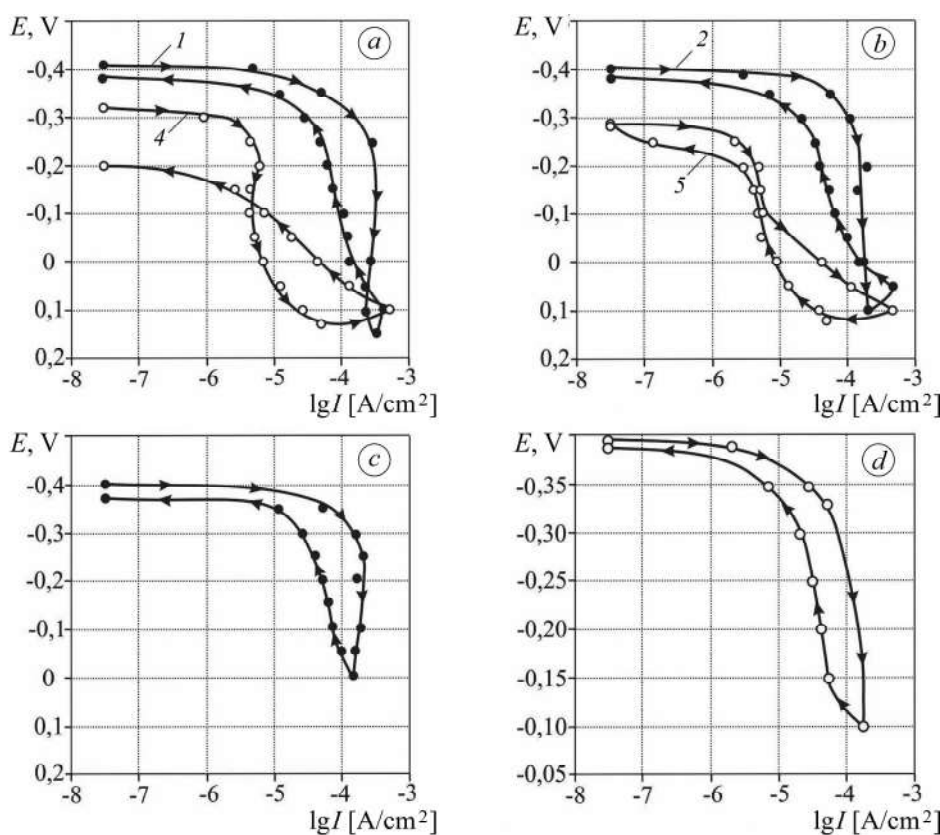


Рис. 1. Анодні потенціодинамічні криві прямого та зворотного ходу сталей AISI 304 (плавки 1–5) і 08X18H10 у 3%-му розчині NaCl при $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$: а – пл. 1 (1), пл. 4 (4); б – пл. 2 (2), пл. 5 (5); в – пл. 3; д – сталь 08X18H10.

Fig. 1. Anodic potentiodynamic curves of forward and reverse movement of AISI 304 (melts 1–5) and 08X18H10 steels in a 3% NaCl solution at $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$: а – melt 1 (1), melt 4 (4); б – melt 2 (2), melt 5 (5); в – melt 3; д – 08X18H10 steel.

Проаналізувавши ці площі, а також питому магнетну сприйнятливості [20, 21] досліджуваних сталей, яка зростала так: пл. 3 сталі AISI 304 і сталь 08X18H10 ($2,23 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), пл. 5 ($2,24 \cdot 10^{-8}$), пл. 2 ($2,25 \cdot 10^{-8}$), пл. 1 ($2,27 \cdot 10^{-8}$), пл. 4 ($2,31 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$), побачили, що між ними є складна залежність.

При цьому найменшим ($2,23 \cdot 10^{-8}$; $2,24 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) та найбільшому ($2,31 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) значенням питомої магнетної сприйнятливості (пл. 3, 5 сталі AISI 304,

сталь 08X18H10 та пл. 4 сталь AISI 304) відповідають максимальні значення площі петлі гістерезису. Слід зауважити, що більша площа петлі гістерезису, то вищі корозійні втрати сталі в локальних корозійних пошкодах.

Відзначимо, що такі результати узгоджуються з дослідженнями [14, 21], оскільки встановлено, що у пл. 3, 5 сталі AISI 304 і сталі 08X18H10 максимальна швидкість локальної корозії K (g/m^2), яку визначали у розчині FeCl_3 згідно з ГОСТ 9.912-89. Отже, незалежно від параметрів хлоридовмісного середовища та умов випробувань отримано аналогічні залежності. Можна припустити, що корозійне розчинення металів у локальних корозійних пошкодах, найвірогідніше, не залежить від параметрів хлоридовмісного середовища (рН і концентрація хлоридів) та умов випробувань і відбувається з характерними особливостями притаманними селективному розчиненню металів у стабільних виразах [10].

Аналіз площ петлі гістерезису досліджуваних сталей (рис. 1) та їх хімічного складу (див. таблицю) показав, що максимальним площам відповідає мінімальний вміст С і N. До того ж між цими величинами також існує складна залежність, яка аналогічна тій, яку спостерігали між площею петлі гістерезису досліджуваних сталей та їх питомою магнетною сприйнятливістю χ_0 аустеніту. Це узгоджується з працями [20, 21], де встановлена кореляція між питомою магнетною сприйнятливістю, швидкістю корозії та вмістом С і N у сталях AISI 304, 08X18H10. Водночас слід відзначити, що між площею петлі гістерезису досліджуваних сталей та вмістом у них Cr, Ni, Mn, Si, P, S не виявлено кореляційного зв'язку. Хоча, згідно з результатами праць [10–12], КТП сталей AISI 304 і AISI 321 підвищується зі збільшенням у них вмісту Cr за випробувань у модельних оборотних водах з рН 4...8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 mg/l. Однак слід зауважити, що КТП сталей і сплавів характеризує їх опір локальній корозії, а площа петлі гістерезису та корозійні втрати з пітингів K (g/m^2) – інтенсивність корозійних втрат металів в локальних корозійних пошкодах. Отже, Cr, зміцнюючи оксидні плівки на поверхні сталей і сплавів, підвищує їх опір локальній корозії в хлоридовмісних середовищах, а С і N сприяють зниженню корозійних втрат металів у локальних корозійних пошкодах та їх репасивації. Це узгоджується з результатами [22–27].

Аналіз площ петлі гістерезису досліджуваних сталей та об'єму в них оксидів [10] показав, що вони зростають зі збільшення об'єму цих включень. Отже, включення, в околі яких зароджуються та розвиваються пітинги, як і питома магнетна сприйнятливість цих сталей, відіграють однаково важливу роль у їх локальній корозії в хлоридовмісних середовищах.

Аналіз даних у таблиці та питомої магнетної сприйнятливості досліджуваних сталей не виявив однозначної залежності χ_0 від вмісту в них Ni та розкисників Mn і Si (в межах стандарту досліджуваних сталей). Проте вміст С, N, S, P та Cr суттєво впливає на питому магнетну сприйнятливість цих сталей [22]. Встановлено, що показник χ_0 досліджуваних сталей зростає від $2,24 \cdot 10^{-8}$ до $2,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ зі збільшенням у них вмісту С від 0,03 до 0,05 mass%, але подальше його збільшення від 0,05 (пл. 4) до 0,071 mass% (пл. 1) сприяє зниженню χ_0 сталей до $2,23 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (пл. 3 сталь AISI 304 і сталь 08X18H10). Це зумовлено тим, що за кімнатної температури максимальна розчинність С у твердому розчині аустеніту до 0,05 mass% [28]. Водночас виявлено, що χ_0 досліджуваних сталей зростає від $2,24 \cdot 10^{-8}$ (пл. 5) до $2,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (пл. 4) зі збільшенням у них вмісту N від 0,039 до 0,044 mass%, а подальше збільшення його вмісту в сталях від 0,046 (пл. 2) до 0,055 mass% (пл. 3) сприяє зниженню χ_0 до $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (пл. 3). Це зумовлено випаданням із твердого розчину аустеніту карбідів і карбонітридів Cr, оскільки за його розчинності в твердому розчині аустеніту до 18 mass% спостерігаємо зростання показника χ_0 від $2,23 \cdot 10^{-8}$ (сталь 08X18H10) до $2,27 \cdot 10^{-8}$ (пл. 1) та $2,31 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (пл. 4). В результаті з'ясовано, що показники χ_0 зростають від $2,24 \times$

$\times 10^{-8}$ до $2,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (пл. 5, 4) зі збільшенням у них вмісту N від 0,039 (пл. 5) до 0,044 mass% (пл. 4). Подальше збільшення вмісту N у цих сталях за межі його розчинності в твердому розчині аустеніту до 0,055 mass% сприяє зниженню χ_0 (пл. 3) до $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Фосфор, розчинений у твердому розчині аустеніту сталей, підвищує розчинність у ньому Cr [29] та показника χ_0 . Слід відзначити, що сірка, розчинена в твердому розчині аустеніту, як і P, підвищує розчинність у ньому Cr [29] і, так підвищує показник χ_0 , оскільки виявлено, що він зростає від $2,24 \cdot 10^{-8}$ (пл. 5) до $2,31 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (пл. 4) зі збільшенням вмісту S від 0,001 до 0,002 mass%. Але за вмісту сірки 0,004 mass% (пл. 3) і 0,006 mass% (сталь 08X18H10), який близький до її максимальної розчинності в твердому розчині аустеніту (0,005 mass% [29]), ці показники найменші $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.

Вищенаведений аналіз впливу C, N, S, P та Cr на питому магнетну сприйнятливність аустеніту досліджуваних сталей пояснює встановлені залежності між граничними потенціалами (E_{crev} , $E_{\text{тр}}$), $E_{\text{сог}}$, ΔE -критерієм та вмістом у них C (рис. 2a–d).

Зокрема встановлено, що потенціал вільної корозії $E_{\text{сог}}$ досліджуваних сталей пропорційно зсувається у від'ємний бік від $-0,28$ (пл. 5) до $-0,41 \text{ V}$ (пл. 1) зі збільшенням у них вмісту C від 0,03 до 0,071 mass% (рис. 2a).

Водночас потенціал репасивації досліджуваних сталей $E_{\text{тр}}$ практично не змінюється при вмісті C від 0,03 до 0,05 mass% і становить у середньому $-0,145 \text{ V}$ (рис. 2c). Це зумовлено тим, що C розчинений у твердому розчині аустеніту. Зі збільшенням у сталях вмісту C до 0,067 mass% потенціал $E_{\text{тр}}$ інтенсивно зсувається у додатний бік (до $+0,29 \text{ V}$), що пов'язано з випаданням карбідів із твердого розчину аустеніту. Однак подальший ріст вмісту C до 0,075 mass% (пл. 3) сприяє зсуванню потенціалу $E_{\text{тр}}$ у від'ємний бік (до $-0,3 \text{ V}$). Найвірогідніше це зумовлено випаданням карбонітридів Cr за такого вмісту C у сталях, що негативно впливає на опір локальній корозії в щілині в хлоридовмісному середовищі, оскільки ΔE -критерій сталей в цьому інтервалі концентрацій C знижується від 0,69 до 0,02 V (рис. 2d). При цьому, згідно з працями [1, 2], якщо ΔE -критерій $< 0,05$, вважають, що сталь нетривка до локальної корозії за таких умов випробувань. Слід зауважити, що потенціал щілинної корозії E_{crev} за вмісту C в сталі від 0,03 до 0,05 mass% залишається сталим $\sim -0,01 \text{ V}$, але зі збільшенням C до 0,075 mass% він зсувається у додатний бік до $+0,1 \text{ V}$ (рис. 2b), що пов'язано з випаданням карбідів хрому. Однак подальший ріст C у сталях до 0,075 mass% сприяє випаданню карбонітридів Cr та зсуванню E_{crev} у від'ємний бік (до $-0,1 \text{ V}$). Слід зауважити, що сталь 08X18H10 і пл. 2 сталі AISI 304 містять близьку кількість вуглецю, 0,06 і 0,067 mass%, відповідно (див. таблицю). Але ΔE -критерій пл. 2 сталі AISI 304 (рис. 2d, точка 2) має найвище, а 08X18H10 (точка 6) – найнижче значення. Це зумовлено тим, що потенціали $E_{\text{сог}}$ цих сталей близькі (рис. 2a), а $E_{\text{тр}}$ пл. 2 має набагато позитивніше значення, ніж $E_{\text{тр}}$ сталі 08X18H10 (рис. 2c). Така тенденція зумовлена тим, що сталь 08X18H10 не легована азотом.

Зазначимо, що C, розчинений у твердому розчині аустеніту, не впливає на потенціали E_{crev} , $E_{\text{тр}}$ та ΔE -критерій, але випадання карбідів Cr із твердого розчину аустеніту за концентрації C в сталі від 0,05 до 0,067 mass% сприяє зсуванню потенціалів E_{crev} і $E_{\text{тр}}$ у додатний бік, підвищуючи опір сталей щілинній корозії, що також засвідчує ріст ΔE від 0,14 до 0,69 V. Проте випадання карбонітридів хрому із твердого розчину аустеніту за збільшення вмісту C до 0,075 mass% сприяє стрибкоподібному зсуванню потенціалів E_{crev} , $E_{\text{тр}}$ у від'ємний бік та зниженню ΔE до 0,02 V, що свідчить про низький опір щілинній корозії.

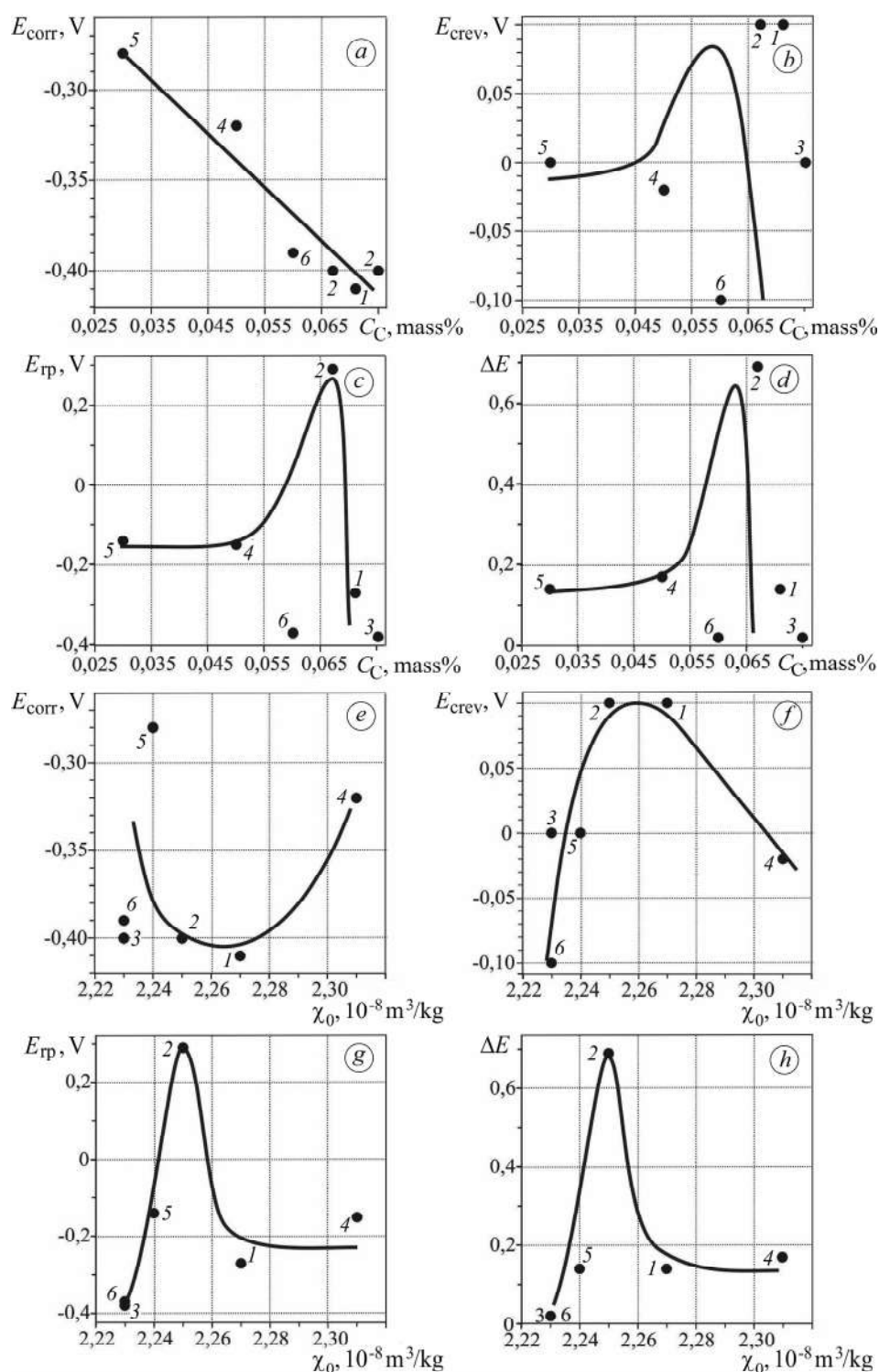


Рис. 2. Залежність потенціалів E_{corr} , E_{crev} , $E_{\text{гp}}$ та базису тривкості до щілинної корозії ΔE сталей AISI 304 і 08X18H10 від вмісту в них вуглецю (а–d) та питомої магнетної сприйнятливості χ_0 аустеніту (е–h). Цифри біля точок відповідають номерам плавки.

Fig. 2. Dependence of potentials E_{corr} , E_{crev} , $E_{\text{гp}}$ and crevice corrosion resistance basis ΔE of AISI 304 and 08X18H10 steels on their carbon content (a–d) and the specific magnetic susceptibility χ_0 of austenite (e–h). The numbers next to the points correspond to the numbers of the meltings.

Аналіз показав (рис. 2e–h), що між потенціалами E_{crev} , $E_{\text{тр}}$, $E_{\text{сог}}$ і ΔE -критерієм досліджуваних сталей та їх питомою магнетною сприйнятливостю χ_0 аустеніту існують нелінійні залежності. Це можливо пов'язано зі зміною хімічного складу сталей (див. таблицю). Зокрема, параметр χ_0 зростає від $2,23 \cdot 10^{-8}$ до $2,25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ зі збільшенням вмісту Cr від 17,44 до 17,96, C від 0,03 до 0,05, N від 0,039 до 0,044, S від 0,001 до 0,003, P від 0,024 до 0,028 mass%. За таких умов ці хімічні елементи, здебільшого, розчинені в твердому розчині аустеніту і це позитивно впливає на опір досліджуваних сталей щілинній корозії в хлоридовмісних середовищах, оскільки потенціал вільної корозії $E_{\text{сог}}$ (рис. 2e) інтенсивно зсувається у від'ємний бік від $-0,28$ (пл. 5) до $-0,40 \text{ В}$ (пл. 2), репасивації в щілині $E_{\text{тр}}$ (рис. 2g) у додатний від $-0,38$ (пл. 3), $-0,37$ (сталь 08X18H10) до $+0,29 \text{ В}$ (пл. 2). Це сприяє тому, що ΔE -критерій (рис. 2h) зростає від 0,02 (пл. 3), сталь 08X18H10 (низький опір щілинній корозії) до 0,69 В, пл. 2 (високий).

Слід відзначити, що граничний потенціал E_{crev} (рис. 2f) також інтенсивно зсувається у додатний бік від $-0,1$ (сталь 08X18H10) до $+0,1 \text{ В}$ (пл. 1, 2 сталь AISI 304). Отже, опір досліджуваних сталей щілинній корозії зростає зі збільшенням їх параметра χ_0 від $2,23 \cdot 10^{-8}$ до $2,25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Однак подальше зростання показника χ_0 до $2,31 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ сприяє зсуванню потенціала $E_{\text{сог}}$ у додатний від $-0,41$ (пл. 1) до $-0,32 \text{ В}$ (пл. 4) (рис. 2e), а $E_{\text{тр}}$ у від'ємний від 0,29 (пл. 2) до $-0,15$ (пл. 4), $-0,27 \text{ В}$ (пл. 1) (рис. 2g). Це сприяє зниженню ΔE -критерію від 0,69 (пл. 2) до 0,14 (пл. 5) і 0,17 (пл. 4) (рис. 2h). Як бачимо, низький опір щілинній корозії у пл. 3 сталі AISI 304 і 08X18H10 відповідає найменшим значенням їх параметра χ_0 ($2,23 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Слід відзначити, що потенціал E_{crev} також інтенсивно зсувається у від'ємний бік від 0,1 (пл. 1, 2) до $-0,02 \text{ В}$ (пл. 4) зі збільшенням параметра χ_0 від $2,25 \cdot 10^{-8}$ до $2,31 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ (рис. 2f).

Узагальнюючи вищевикладене, зазначимо, що питому магнетну сприйнятливості аустеніту сталей AISI 304 і 08X18H10 можна застосовувати для оцінки їх тривкості до щілинної корозії в хлоридовмісних середовищах, оскільки вона є інтегральною характеристикою сталей [20, 21], яка залежить від їх хімічного складу і структурної гетерогенності.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень встановлено, що потенціал вільної корозії $E_{\text{сог}}$ сталей AISI 304 і 08X18H10 стрімко зсувається у від'ємний бік від $-0,28$ до $-0,41 \text{ В}$ зі збільшенням їх питомої магнетної сприйнятливості χ_0 аустеніту від $2,23 \cdot 10^{-8}$ до $2,27 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Водночас виявлено, що потенціал репасивації сталей у щілині $E_{\text{тр}}$ інтенсивно зсувається у додатний бік від $-0,38$ до $+0,29 \text{ В}$ з ростом параметра χ_0 від $2,23 \cdot 10^{-8}$ до $2,25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, що сприяє збільшенню ΔE -критерію від 0,02 до 0,69 В. Аналогічні тенденції спостерігали для потенціалу щілинної корозії E_{crev} , який зсувається у додатний бік від $-0,1$ до 0,1 В зі збільшенням параметра χ_0 від $2,23 \cdot 10^{-8}$ до $2,27 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Отже, в такому інтервалі параметра χ_0 опір сталей щілинній корозії зростає. Це зумовлено тим, що C, N, S, P, здебільшого, розчинені в твердому розчині аустеніту сталей. Однак за подальшого збільшення параметра χ_0 до $2,31 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ потенціал $E_{\text{сог}}$ зсувається в додатний, а $E_{\text{тр}}$ – у від'ємний бік, що сприяє зниженню ΔE -критерію сталей. Водночас показано, що E_{crev} сталей в цьому інтервалі параметра χ_0 також зсувається у від'ємний бік, що знижує опір сталей щілинній корозії. Це зумовлено тим, що χ_0 аустеніту також залежить від хімічного складу сталей. Питому магнетна сприйнятливості χ_0 аустеніту є інтегральною характеристикою досліджуваних сталей, яку можна застосовувати для оцінки і прогнозування тривкості сталей до щілинної корозії в оборотних водах під час експлуатації теплообмінників.

1. Tarantseva K. R. and Pakhomov V. S. Pitting resistance criteria for corrosion-resistant steels // Chem. Petrol. Eng. – 2009. – **45**. – P. 381–386. <https://doi.org/10.1007/s10556-009-9198-8>
2. A comparative study on the critical pitting criteria of a super ferritic stainless steel at different temperatures in chloride or bromide solution / L. Lei, Y. Sun, K. Zheng, X. Wang, P. He, Y. Liu, Q. Yao, L. Yin, Y. Wan, J. Li, and Y. Jiang // Corr. Sci. – 2021. – **183**. – Article number: 109311. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109311>.
3. Investigation of electrochemical properties in chloride-containing commercial waters / A. Narivskiy, R. Atchibayev, A. Muradov, K. Mukashev, and Y. Yar-Mukhamedov // Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2018. – **18**, № 6.1. – P. 267–274. DOI: 10.5593/sgem2018/6.1/S24.036.
4. Corrosion losses of alloy 06KhN28MDT in chloridcontaining commercial waters / A. Narivsk'yi, G. Yar-Mukhamedova, E. Temirgaliyeva, M. Mukhtarova, and Y. Yar-Mukhamedov // Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference: SGEM. – 2016. – **1**. – P. 63–70. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85032432067&partnerID=40&md5=6e550b383887d2ca4405fb7ecc84ec05>
5. Burstein G. T. and Moloney J. J. Cyclic thermammetry // Electrochem. Commun. – 2004. – № 6. – P. 1037–1041. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2004.08.006>
6. A revealing the corrosion resistance of 316 L stainless steel by an in situ grown nano oxide film / Y. Ren, Y. Li, J. Shen, S. Wu, L. Liu, and G. Zhou // Nanomaterials (Basel). – 2023. – **13**, № 3. – 578 p. <https://doi.org/10.3390/nano13030578>
7. Effects of sulfur addition on pitting corrosion and machinability behavior of super duplex stainless steel containing rare earth metals: Part 2 / S. H. Jeon, S. T. Kim, I. S. Lee, and Y. S. Park // Corr. Sci. – 2010. – **52**, № 10. – P. 3537–3547. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.07.002>
8. Abd El Meguid E. A. and Abd El Latif A. A. Critical pitting temperature for type 254 SMO stainless steel in chloride solutions // Corr. Sci. – 2007. – **49**, № 2. – P. 263–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.011>.
9. Newman R. C. Understanding the corrosion of stainless steel // Corrosion. – 2001. – № 57. – P. 1030–1041. DOI: <http://dx.doi.org/10.5006/1.3281676>.
10. Mathematical modeling of the corrosion behavior of austenitic steels in chloride-containing media during the operation of plate-like heat exchangers / O. Narivsk'yi, R. Atchibayev, A. Kemelzhanova, G. Yar-Mukhamedova, G. Snizhnoi, S. Subbotin, and A. Beisebayeva // Eurasian Chemico-Technological J. – 2022. – **24**, № 4. – P. 295–301. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj1473>.
11. Influence of chloride-containing media on the pitting resistance of AISI 321 steel / O. E. Narivskiy, S. B. Belikov, S. A. Subbotin, and T. V. Pulina // Materials Science. – 2021. – **57**, № 2. – P. 291–297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00544-z>.
12. Assessment and prediction of the pitting resistance of plate-like heat exchangers made of AISI304 steel and operating in circulating waters / O. E. Narivskiy, S. A. Subbotin, T. V. Pulina, and M. S. Khoma // Materials Science. – 2022. – **58**, № 1. – P. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00628-4>.
13. The composition of the boundary region of MnS inclusions in stainless steel and its relevance in triggering pitting corrosion / P. Schmuki, H. Hildebrand, A. Friedrich, and S. Virtanen // Corr. Sci. – 2005. – № 47. – P. 1239–1250. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.023>
14. Mishchenko V. G., Snizhnoi G. V. and Narivsk'yy O. Eh. Magnetometric investigations of corrosion behaviour of AISI 304 steel in chloride-containing environment // Metallofizika i noveishie tekhnologii. – 2011. – **33**, № 6. – P. 769–774. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-82055186301&partnerID=40&md5=9bd1491e651ef497fdc51c1b777869ca>
15. Webb E. G. and Alkire R. C. Pit initiation at single sulfide inclusions in stainless steel II. Detection of local pH, sulfide and thiosulfate // J. Electrochem. Soc. – 2002. – № 149. – P. 280–285. DOI 10.1149/1.1474431
16. Webb E. G. and Alkire R. C. Pit initiation at single sulfide inclusions in stainless steel // J. Electrochem. Soc. – 2002. – № 149. – P. 286–295. DOI 10.1149/1.1474430
17. Why stainless steel corrodes / M. P. Ryan, D. E. Williams, R. J. Chater, B. M. Hutton, and D. S. Mc Phail // Nature. – 2002. – № 415. – P. 770–774. <https://doi.org/10.1038/415770a>
18. Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions / A. Pardo, M. C. Merino, A. E. Coy, F. Viejo, R. Arrabal, and E. Matykina // Corr. Sci. – 2008. – № 50. – P. 1796–1806. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.005>

19. *Induced-pitting* behaviors of MnS Inclusions in steel // S. Yang, M. Zhao, J. Feng, J. Li, and C. Liu // High Temperature Materials and Processes. – 2018. – **37**, № 9–10. – P. 1007–1016. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0155>
20. Snizhnoi G. V. Dependence of the corrosion behavior of austenitic chromium nickel steels on the paramagnetic state of austenite // Materials Science. – 2013. – **49**, № 3. – P. 341–346. DOI: 10.1007/s11003-013-9620-4
21. Snizhnoi G. Dependence of corrosion resistance of austenitic chromium-nickel steels on the magnetic state of austenite. – London, 2022. – P. 41–62. DOI: 10.5772/intechopen.102388.
22. *Enhancing* the pitting resistance of AISI 430 stainless steel by laser treatment / I. Filatov, V. Prokopiev, N. Shchedrina, R. Suslov, R. Bogdanov, D. Bachurina, E. Davydova, and G. Odintsova // Springer Nature (preprint). – 2021. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2244454/v1>
23. *Influence* of microstructure and manganese sulfides on corrosion resistance of selective laser melted 17-4 PH stainless steel in acidic chloride medium / M. Alnajjar, F. Christien, V. Barnier, C. Bosch, K. Wolski, A. D. Fortes, and M. Telling // Corr. Sci. – 2020. – **168**. – Article number: 108585. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108585.
24. *Influence* on pitting corrosion resistance of AISI 301LN and 316L stainless steels subjected to cold-induced deformation / P. M. O. Silva, M. C. C. Filho, J. A. Cruz, A. J. M. Sales, A. S. B. Sombr, and J. M. R. S. Tavares // Metals. – 2023. – **13**, № 3. – 443 p. <https://doi.org/10.3390/met13030443>
25. *Revealing* significant effect of nitrogen on prolonging pitting corrosion lifetime of martensitic stainless steel by modelling approach / J. Dai, H. B. Li, H. Feng, Z. H. Jiang, J. D. Qu, Y. Zhao, and T. Zhang // Corr. Sci. – 2022. – **203**. – Article number: 110369. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110369>
26. Snizhnoi V., Snizhnoi G., and Stepanenko S. Determining the role of individual and combined chemical elements in the pitting corrosion process of austenitic Fe–Cr–Ni steels // Eastern-European J. of Enterprise Technologies. – 2022. – **3**, № 12 (117). – P. 13–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.257841>
27. *Corrosion* behaviors of Fe–22Cr–16Mn–0.55N high-nitrogen austenitic stainless steel in 3.5% NaCl solution / S. Xu, F. Gao, J. Han, S. Xiong, X. Duan, F. Zha, B. Yu, L. Yang, Y. Qiao, Z. Zheng, and J. Chen // Coatings. – 2022. – **12**, № 11. – Article number: 1769. <https://doi.org/10.3390/coatings12111769>
28. *On the carbon* solubility in expanded austenite and formation of hägg carbide in AISI 316 stainless steel / T. Christiansen, K. Stahl, B. K. Brink, and M. A. J. Somers // Steel Research Int. – 2016. – **87**, № 11. – P. 1395–1405. <https://doi.org/10.1002/srin.201500415>
29. *Effect* of phosphorus content on the mechanical, microstructure and corrosion properties of supermartensitic stainless steel / C. A. D. Rodrigues, R. M. Bandeira, B. B. Duarte, G. Tremiliosi-Filho, and A. M. Jorge // Mat. Sci. and Eng. A. – 2016. – **650**. – P. 75–83. DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.013

Одержано 26.04.2023