

УДК 669.788

**ВОДНЕВА ПРОНИКНІСТЬ РЕАКТОРНИХ СТАЛЕЙ**

В. В. ФЕДОРОВ

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

Досліджено водневу проникність реакторних сталей 12Х18Н10Т, 316 SS, 10Х9ВФА та легуваних хромомарганцевих сталей ЕП-838 і Х12Г20В у вихідному стані, після термообробки, легування, нанесення захисних покривів і оксидування, опромінення іонами Н<sup>+</sup> та за наявності зварних з'єднань. Розраховано проникання водню  $P_c$ , яке відповідає екологічно безпечному рівню втрат тритію крізь реакторне обладнання у довкілля, і показано, як зміна структури та модифікування поверхні узгоджуються з цією величиною. Визначено проникність і розчинність водню у зварних з'єднаннях досліджуваних сталей.

**Ключові слова:** водень, тритій, воднева проникність, розчинність, коефіцієнт дифузії, легування, оксиди, протонне опромінення, зварний шов.

Найчастіше вузли реакторів та труби теплообмінника в енергетичних установках виготовляють з нержавних аустенітних, хромомарганцевих та феритно-мартенситних сталей, недоліком яких є висока газопроникність. Тому забезпечення низьких значень дифузійних параметрів водню є необхідною умовою розробки нових конструкційних матеріалів сучасної енергетики. Це дає змогу зменшити їх схильність до водневого окрихчення у напруженому стані та запобігти втратам водню і його ізотопів у довкілля, що, враховуючи радіоактивність тритію, має важливе екологічне значення. Визначити водневу проникність можна на основі вимірювання кінетичних та температурних залежностей проникання водню крізь зразки у вигляді мембрани [1]. Рівняння дифузії водню в металевих системах мають вигляд [2]

$$P = P_0 \cdot \exp(-E_P/RT), \quad D = D_0 \cdot \exp(-E_D/RT), \quad S = S_0 \cdot \exp(-H_S/RT),$$

де  $P$  – коефіцієнт водневої проникності,  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $S$  – розчинність водню,  $E_P$  та  $E_D$  – енергії активації відповідних процесів,  $H_S$  – теплота розчинення,  $P_0$ ,  $D_0$  і  $S_0$  – передекспоненційні множники. Розчинність водню розраховується за формулою  $P = S \cdot D$ . При цьому не обов'язково безпосередньо визначати проникання тритію  $P_T$ , оскільки практично для всіх реакторних сталей справджується ізотопний ефект  $P_T / P_H = (m_H / m_T)^{1/2}$ , де  $P$  та  $m$  – проникність і маса відповідного ізотопу. Згідно з цим ефектом і умовою, що рівень радіаційної безпеки за роботи, наприклад, термоядерної енергетичної установки потужністю 103 MVt не повинен перевищувати 1 Кюрі в день, розраховано екологічно безпечне значення проникання звичайного водню, рівне  $P_c = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ mol}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{1/2})$  [3]. Порівняння  $P_c$  з проникністю водню крізь реакторні сталі вказує на необхідність її зменшення від 6 до 200 разів, що можна досягнути легуванням, хіміко-термічною обробкою або нанесенням відповідних захисних покривів чи плівок. Необхідно враховувати також вплив іонного опромінювання під час експлуатації обладнання реактора.

В огляді узагальнено результати досліджень дифузійних параметрів водню (проникності, коефіцієнтів дифузії та розчинності) у реакторних сталях, виконаних у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України впродовж останніх 10 років.

**Методика проведення експерименту.** Проникність водню крізь зразки-мембрани товщиною 1...1,5 mm і діаметром 25...30 mm вимірювали об'ємометричним методом [1]. Експерименти проводили за ступінчатого охолодження з кроком 100 K в інтервалі температур 1173...573 K. Статистична обробка отриманих результатів показала, що точність визначення проникності водню 4...6%. Крім того, досліджували електрофізичні властивості та проводили рентгено-структурний, металографічний і мікрорентгеноспектральний аналізи.

**Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних реакторних сталей**

Сталь	Fe	Cr	Mn	W	Mo	Si	Ni	Al	Ti	C	Sc	Ce
ЕП-838	Осн.	11,8	13,2	–	0,38	0,28	4,90	1,50	–	0,08	–	–
ЕП-838 (плавка 1)	Осн.	12,8	13,6	–	0,37	0,69	4,47	1,24	–	0,05	–	0,01
ЕП-838 (плавка 2)	Осн.	12,9	13,6	–	0,36	0,53	4,39	1,16	–	0,05	0,05	–
ЕП-838 (плавка 3)	Осн.	12,9	13,3	–	0,36	0,60	4,55	1,30	–	0,05	0,10	–
ЕП-838 (плавка 4)	Осн.	12,3	13,8	–	0,45	0,67	4,32	1,51	–	0,05	0,15	–
X12Г20В	Осн.	12,0	20,2	0,95	–	0,33	–	–	0,08	0,10	–	–
X12Г20В (плавка 1)	Осн.	12,5	20,3	0,95	–	0,43	–	–	0,08	0,10	–	–
X12Г20В (плавка 2)	Осн.	12,5	20,7	0,95	–	0,57	–	–	0,08	0,11	0,1	–
X12Г20В (плавка 3)	Осн.	12,2	20,8	1,00	–	0,37	–	–	0,11	0,26	–	–
X12Г20В (плавка 4)	Осн.	11,6	20,7	2,01	–	0,02	–	–	0,22	0,25	–	–
10Х9ВФА	Осн.	9,2	0,5	1,0	–	0,3	–	–	–	0,11	–	–
12Х18Н10Т	Осн.	18,2	1,7	–	–	0,7	10,1	–	0,9	0,12	–	–

Об'єктом дослідження вибрали основні реакторні сталі з різними системами легування (табл. 1), які широко застосовуються у сучасній енергетиці. Поверхню зразків модифікували нанесенням захисних покривів і оксидних плівок. Вплив імплантованих протонів на водневу проникність сталей вивчали на зразках, опромінених в установці “Уран” [4], використовуючи протонні пучки з енергією 1 MeV за густини іонного струму  $40 \text{ mA/m}^2$ , що дало можливість досягти флюенса  $10^{20} \text{ ion/m}^2$ . За такої обробки фазово-структурний стан реакторних матеріалів еквівалентний десятирічній реальній експлуатації термоядерного реактора на дейтерій-третієвій плазмі з відповідною концентрацією імплантованого водню.

Розчинність водню у зварних з'єднаннях сталей визначали за формулою  $S = P/D$ , розраховуючи водневу проникність  $P$  за співвідношенням площ основного металу та зварного шва і визначаючи коефіцієнт дифузії  $D$  водню методом електропровідності у зразках, вирізаних безпосередньо зі зварного шва [5]. Застосовували лазерне зварювання у гелієвій атмосфері, використовуючи лазер ТЛ-5М, який за потужності випромінювання 2,5 kVt дає можливість зварювати зі швидкістю 66 mm/s.

**Вплив термічної обробки та легування на водневу проникність реакторних сталей.** У зв'язку з розробкою термоядерного реактора (ТЯР) на дейтерій-тритієвій плазмі в кінці минулого сторіччя були започатковані спільні з США комплексні дослідження сталей: вітчизняних 12Х18Н10Т, ЕП-838, Х12Г20В та американської 316 SS (аналог 06Х17Н12М2ГС) [6]. Причому сторони обмінювалися між собою зразками.

Результати, отримані в обох країнах, переважно добре узгоджувалися між собою, однак стосовно водневої проникності виникли певні розбіжності. Тому у ФМІ НАН України були проведені вимірювання дифузійних параметрів водню у цих сталях за умов, найбільш наближених до реальних. Зокрема, збільшили температурний інтервал досліджень від 973 до 1173 К та провели низку ізотермічних відпалів [7].

Дослідження дифузійних параметрів водню в сталі 12Х18Н10Т показали (рис. 1а, політерма 1), що її воднева проникність практично не залежить від умов високотемпературного відпалу на базі до 30 h. Аналогічний результат отримано і для сталі 316 SS (політерма 2). У випадку хромомарганцевої сталі ЕП-838 встановлено, що термічна обробка у водні впродовж 5...8 h ( $T = 900...980$  К) змінює її фазово-структурний стан формуванням збагачених марганцем мікрообластей типу  $Fe_3Mn$ . Однак отримане зменшення проникання водню (політерми 3 і 4) недостатнє, оскільки перевищує екологічно безпечний коефіцієнт проникання  $P_c$  (штрихова лінія на рис. 1). Знайдена аномалія водневої проникності сталі ЕП-838 за температури 983 К відповідає поліморфному  $\alpha \leftrightarrow \beta$  перетворенню у залізомарганцевих мікрообластях, формування яких стимулює розчинений водень. Отриманий результат підтверджено металографічним аналізом та вимірюванням електрофізичних властивостей.

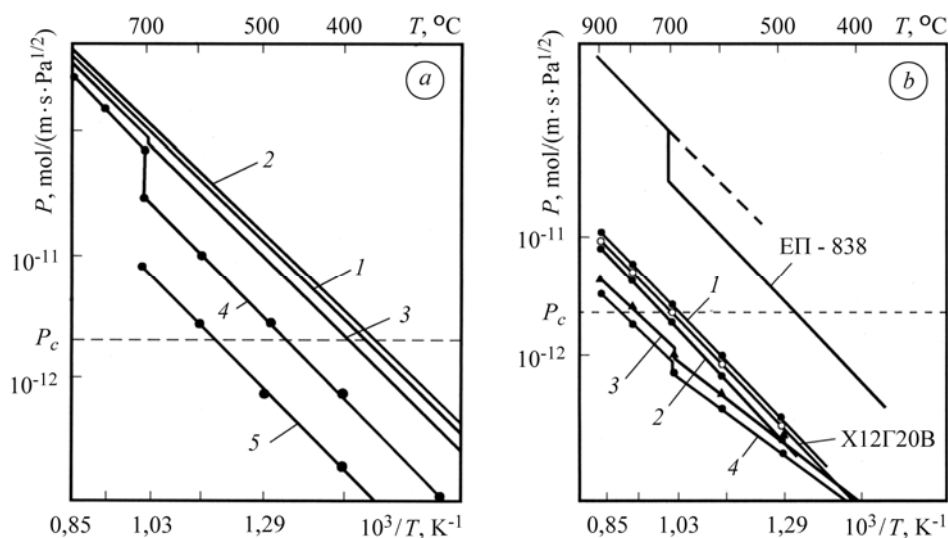


Рис. 1. Воднева проникність досліджуваних сталей: 1 – 12Х18Н10Т; 2 – 316 SS; 3, 4 – ЕП-838 до та після водневої обробки; 5 – ЕП-838, легованої церієм після водневої обробки (а) і легованої сталі Х12Г20В (номери політерм відповідають номеру плавки з табл. 1) (b).

Fig. 1. Hydrogen permeability of steels: 1 – 12X18H10T; 2 – 316SS; 3, 4 – ЕП-838 before and after hydrogen treatment; 5 – ЕП-838 + Ce after hydrogen treatment (a) and X12Г20В steel (numbers of polyterms correspond to numbers of steels in the table 1) (b).

Найважливішим наслідком збільшення концентрації марганцю за рахунок нікелю у сталі Х12Г20В (див. табл. 1) є зниження водневої проникності у 8–12 разів (рис. 1b), яке задовольняє екологічно безпечний рівень  $P_c$ . При цьому для

забезпечення необхідного рівня фізико-механічних характеристик та стійкості до радіаційного розпухання під опроміненням сталі ЕП-838 і Х12Г20В легують металами III–IV груп та рідкісноземельними елементами (РЗМ).

Дослідження водневої проникності крізь сталь ЕП-838 (див. табл. 1, плавки 1–4) показали, що у зразках, легованих скандієм і церієм, фазовий перехід при 983 К відсутній. Близькі значення енергії активації проникання для зразків усіх чотирьох плавок ( $E_p = 59,0 \pm 2,2$  kJ/mol) свідчать, що розчинений водень впливає лише на параметр ґратки (інтерметалічні фази на основі РЗМ і металів третьої групи є гідридотвірні) [2]. Тому воднева обробка ( $T = 900$  К,  $\tau = 5$  h) зразків сталі ЕП-838, легованих церієм (див. табл. 1, плавка 1), призводить до ще більшого зменшення водневої проникності (рис. 1а, політерма 5), що задовольняє вимоги експлуатації першої стінки ТЯР (штрихова лінія на рис. 1).

Легування сталі Х12Г20В скандієм зменшує потік водню (рис. 1б, політерма 2), а збільшення вмісту вольфраму і титану не тільки знижує водневу проникність (політерма 4), але й підвищує на 15...20% міцнісні характеристики [1]. Поява у цьому випадку зламів на політермах проникання водню зумовлена, очевидно, збільшенням вмісту вуглецю, який зв'язує легувальні елементи у карбіди, сприяючи утворенню інтерметалідів  $Fe_3Mn$  на межах зерен та виділенню мікрообластей  $\alpha$ -заліза в аустенітній матриці сталі, що підтверджено металографічним та мікрорентгеноспектральним аналізами [3, 7].

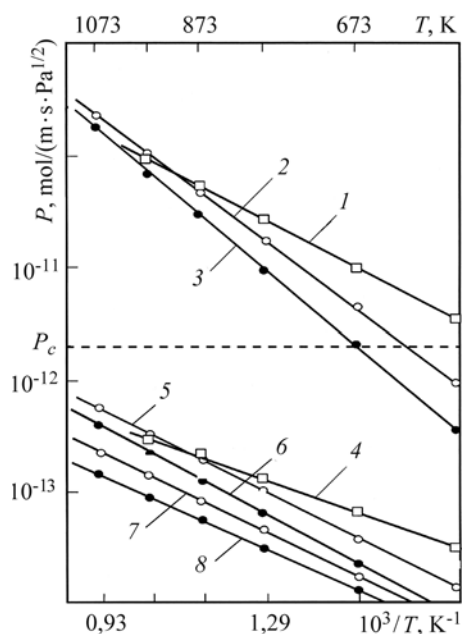


Рис. 2. Політерми водневої проникності сталей 10Х9ВФА (1, 4), ЕП-838 (2, 5, 7) та 12Х18Н10Т (3, 6, 8) у вихідному стані (1–3), після циклічного оксидування (4–6) та опромінення іонами  $H^+$  (7, 8).

Fig. 2. Polyterms of hydrogen permeability of 10X9VFA (1, 4), EP-838 (2, 5, 7) and 12X18N10T (3, 6, 8) steels in the original state (1–3), after cyclic oxidation (4–6) and irradiation by ions  $H^+$  (7, 8).

**Вплив оксидування, протонного опромінення та захисних покривів на водневу проникність реакторних сталей.** Необхідною умовою утворення гомогенних оксидних плівок з доброю адгезією та щільністю і стійких до дії відновлювального середовища є чергування оксидування з витримкою у газоподібному водні, який відновлює нетривкі оксидні фракції і, розчиняючись у сталях, пришвидшує перерозподіл легувальних елементів [1]. Створені таким чином захисні плівки тривкі до дії водню за температур 973...1023 К, а також поліпшують жаротривкість залізохромистих сталей.

Циклічне оксидування сталей 10Х9ВФА, ЕП-838 та 12Х18Н10Т зменшує і водневу проникність (у 120–160 разів), і енергію активації проникання (на 30%) (рис. 2, політерми 4–6) [8]. Тип та структуру оксидних плівок ідентифікували рентгеноструктурним аналізом. Виявлено, що на поверхні цих сталей формується хромиста шпінель  $FeO_2 \cdot (Fe, Cr)_2O_3$ , а у випадку сталі Х12Г20В – шпінель зі структурою  $MnCr_2O_4$ , яка також понижує водневу проникність [3]. З проведених досліджень можна зробити важливий для практики висновок – що більший вміст

хрому у сталі, то менша її воднева проникність після циклічного оксидування.

Вплив імплантованих атомів водню на водневу проникність проілюструємо на прикладі сталі 12X18H10T [8]. Одностороннє опромінення зразків незначно зменшує водневу проникність (рис. 3а, політерми 1 і 2), що можна пояснити згладжуванням мікрорельєфу поверхні через бомбардування протонами. Суттєво посилює ефект двостороннє опромінення (політерма 3), яке знижує проникання водню майже вдвічі. Щоб з'ясувати критичну температуру термодесорбції імплантованих атомів водню зі сталі, вимірювали водневу проникність за двостороннього опромінення зразків під час нагріву. Тут потік водню на низькотемпературній ділянці набагато більший (політерма 4) і лише вище 623 К співпадає з політермою 3. Одночасно зменшується енергія активації проникання. Для сталей ЕП-838 і 10Х9ВФА критична температура термодесорбції водню також знаходиться в інтервалі 600...640 К, що підтверджено результатами вимірювань електропорю і мікротвердості [8, 9].

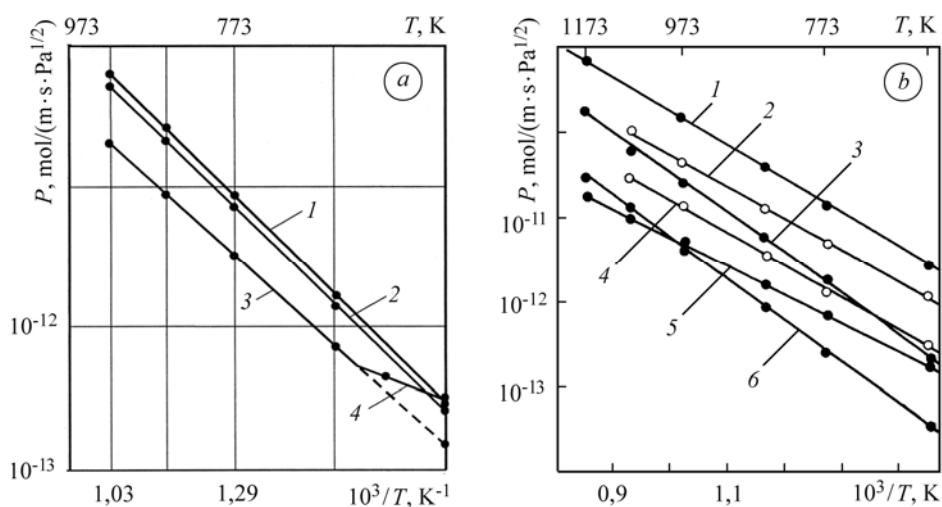


Рис. 3. Вплив опромінення протонами  $H^+$  (а: 1 – вихідний зразок; 2 – одностороннє опромінення; 3, 4 – двостороннє) та захисних покриттів (б: 1 – вихідний зразок; 2 – покриття “БМ”; 3 –  $Al_2O_3 + Al$ ; 4 – покриття “БКН”; 5 –  $Ni + Mo + Al$ ; 6 – двостороннє борування) на водневу проникність сталі 12X18H10T.

Fig. 3. Influence of irradiation by protons  $H^+$  (a: 1 – original specimen; 2 – one-side irradiated; 3, 4 – two-side irradiated) and protective coatings (b: 1 – starting permeability; 2 – Be + Mo coating, 3 –  $Al_2O_3 + Al$ ; 4 – Be + Cu + Ni coating; 5 – Ni + Mo + Al; 6 – two-sided boronizing) on hydrogen permeability of 12X18H10T steel.

Встановлено, що бар’єрна дія прониканню водню та оксидів зі шпінельною структурою після імплантації протонів посилюється, а енергія активації зменшується (див. рис. 2, політерми 7 і 8). Тому можна зробити висновок, що протонне опромінення не відновлює такі оксиди, а підвищує їх гомогенність та адгезію. Таким чином, водневу тривкість реакторних сталей можна значно поліпшити, застосовуючи сумісний вплив термообробки у газоподібному водні і протонного опромінення під час формування захисних оксидних плівок.

У зв’язку з проблемою захисту обладнання атомних електростанцій і ТЯР від наводнення, досліджували інтерметалідні берилієві покриття та особливості їх деградації у середовищі водню [1, 9]. Покриття двох типів: “БМ” (Be + Mo) та “БКН” (Be + Cu + Ni) наносили на зразки зі сталі 12X18H10T товщиною 0,5...0,6 mm газотермічним методом. Встановлено (рис. 3б), що за значної різниці в товщинах (“БМ” – 25  $\mu m$ , “БКН” – 2,5  $\mu m$ ) ефект бар’єрної дії останнього у два рази вищий (політерми 2 та 4), що, згідно з металографічним аналізом, є наслідком більшої

його щільності та гомогенності. Порівняння отриманих результатів з найуживанішими захисними покриттями [1] показало, що покриття "БКН" інтенсивніше знижує швидкість проникання водню, ніж плазмовий композиційний  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}$  (політерма 3) і за своїм впливом співмірний з композиційним покриттям  $\text{Ni} + \text{Mo} + \text{Al}$  (політерма 5). Найбільше зменшення водневої проникності спостерігається для борованої сталі (політерма 6), але тут необхідно враховувати, що борування проводили з обох сторін зразка і його товщина  $80 \mu\text{m}$  ("БКН" лише  $2,5 \mu\text{m}$ ). Крім того, у водні має місце значний ефект розсмоктування боридного покриття (впродовж 30...40 h) [1], на відміну від покриття "БКН", який в таких же умовах практично не деградує. Тому для запобігання втрат водню і його ізотопів під час експлуатації енергетичного обладнання найперспективнішими є захисні покриття на основі берилію.

Під час дослідження феритно-мартенситної сталі 10X9ВФА встановлено, що її проникність у 8–10 разів перевищує екологічно безпечний рівень  $P_c$  (рис. 4а). Вивчали зразки у вихідному стані (політерма 1) та відпалені при 873 К (робоча температура ТЯР) у вакуумі 500 h (політерма 2) і водні 30 h (політерма 3) [9–11]. Час відпалів вибирали, виходячи з реальних умов експлуатації реактора у дейтерій-третієвій плазмі. Показано, що у відпалених зразках воднева проникність зростає. При цьому на політермах дифузійних параметрів водню спостерігається  $\gamma \rightarrow \alpha$ -фазове перетворення (перехід 1-го роду), температурне положення якого залежить від умов термічної обробки та тиску газу. Крім того, за охолодження в атмосфері водню різко зростає максимум електроопору в околі температури точки Кюрі [10], що вказує на знеуглецювання сталі, оскільки його висота пропорційна магнетній проникності. Її зміна за відпалу при 873 К у водні стабілізується після 20...22 h, що свідчить про завершення знеуглецювання сталі 10X9ВФА. Підтвердження цьому отримали методом аналізу цифрових зображень результатів металографічного аналізу, з якого слідує, що кількість карбідної фази на одиницю площі після термообробки у водні зменшується на 12...16% [9, 10].

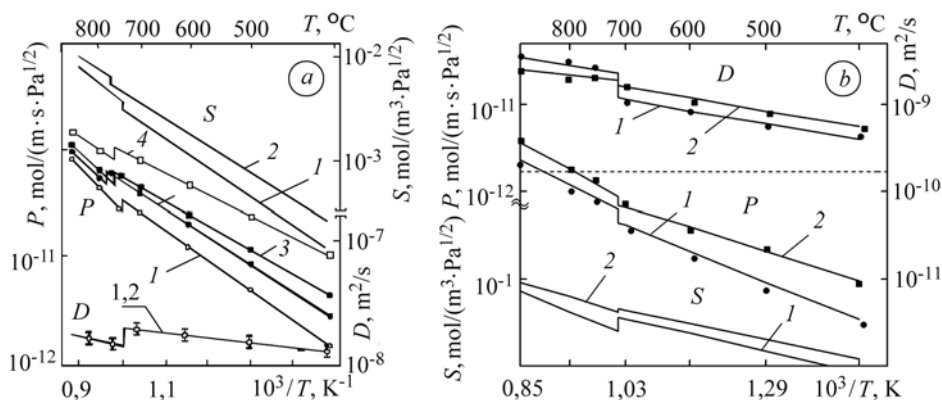


Рис. 4. Дифузійні параметри водню у сталях 10X9ВФА (а: 1 – вихідний зразок; 2 – відпал у вакуумі  $T = 873 \text{ K}$ , 500 h; 3 – відпал у водні  $T = 873 \text{ K}$ , 30 h; 4 – зразок зі зварним швом) та X12Г20В (б: 1 – вихідний зразок; 2 – зразок зі зварним швом).

Fig. 4. Diffusion parameters of hydrogen in 10X9ВФА steel (a: 1 – in the original state; 2 – treatment in vacuum  $T = 873 \text{ K}$ , 500 h; 3 – treatment in hydrogen  $T = 873 \text{ K}$ , 30 h; 4 – with welded joint), and X12Г20В steel (b: 1 – in the original state; 2 – with welded joint).

**Дифузійні параметри водню у реакторних сталях 10X9ВФА і X12Г20В зі зварним швом.** Відомо [1], що основна частка втрат тритію під час роботи реактора припадає на зварні з'єднання реакторних сталей. У проведених дослідженнях [11–14] зварний шов у зразках-мембранах отримували, розрізаючи зразок ла-

зером ЛТ-5М, який після цього ним же зварювали за меншої потужності. Значення коефіцієнтів дифузії водню для сталі 10Х9ВФА в основному металі і зварному шві, отримані методом електропровідності в інтервалі температур 773...1073 К, описують рівняння:

$$D \text{ (m}^2\text{/s)} = 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot (-9,1 \text{ kJ/mol} / RT), \quad D \text{ (m}^2\text{/s)} = 1,2 \cdot 10^{-7} \cdot (-27,1 \text{ kJ/mol} / RT).$$

З метою визначення точності застосованої методики, порівнювали коефіцієнти дифузії водню, отримані методами електропровідності і проникання за температури 873 К. Встановлено, що для основного металу вони практично співпадають  $D_{873 \text{ К}} = (9,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{/s}$ . Оскільки наявність зварного шва призводить до зростання водневої проникності сталі 10Х9ВФА (рис. 4а, політерми 1 і 4), яке пропорційне співвідношенню площ зварного шва  $s_1$  і основного металу  $s_2$  ( $P_4/P_1 = (s_1 + s_2)/s_2$ ), то це дає змогу розрахувати проникність самого зварного шва і на основі отриманих значень  $D$  визначити у ньому розчинність водню  $S$ . Такі ж дослідження проведені для хромомарганцевої сталі Х12Г20В (див. табл. 1, плавка 3) (рис. 4б). В обох випадках дифузійні параметри водню зростають. З табл. 2 можна зробити висновок, що найменшу проникність і розчинність водню має зварний шов сталі Х12Г20В. Таким чином, зварні з'єднання сталі Х12Г20В задовольняють екологічно безпечний рівень проникання, а у випадку сталі 10Х9ВФА необхідний додатковий бар'єр для зниження водневої проникності.

**Таблиця 2. Дифузійні параметри водню в досліджуваних сталях і їх зварних з'єднаннях при  $T = 873 \text{ К}$  [13]**

Сталь	$P_0$ , mol/(m·s·Pa <sup>1/2</sup> )	$E_p$ , kJ/mol	$D_0$ , m <sup>2</sup> /s	$E_D$ , kJ/mol	$S_0$ , mol/(m <sup>3</sup> ·Pa <sup>1/2</sup> )	$H_s$ , kJ/mol
10Х9ВФА	$1,6 \cdot 10^{-8}$	51,6	$1,4 \cdot 10^{-8}$	9,1	1,15	42,5
10Х9ВФА зварний шов	$6,0 \cdot 10^{-8}$	34,2	$1,2 \cdot 10^{-7}$	27,1	0,5	7,1
10Х12Г20В	$3,7 \cdot 10^{-9}$	64,2	$6,3 \cdot 10^{-7}$	51,3	$5,9 \cdot 10^{-3}$	12,9
10Х12Г20В зварний шов	$5,1 \cdot 10^{-8}$	45,3	$2,5 \cdot 10^{-6}$	36,9	$2,0 \cdot 10^{-2}$	8,4
25Х12Г20В	$9,7 \cdot 10^{-11}$	45,0	$1,0 \cdot 10^{-8}$	18,1	$9,7 \cdot 10^{-3}$	26,9
25Х12Г20В зварний шов	$5,3 \cdot 10^{-10}$	31,9	$1,4 \cdot 10^{-8}$	12,4	$3,9 \cdot 10^{-2}$	19,5

Дослідження впливу термічної обробки у вакуумі і водні ( $T = 873 \text{ К}$ ,  $\tau = 10 \text{ h}$ ) на структуру зварних з'єднань сталей 10Х9ВФА і Х12Г20В показали (рис. 5), що на межі розділу основний метал–зварний шов утворюється проміжна зона з дрібнозеренною структурою, яка за наявності розчиненого водню зростає, що можна пояснити водневим знеуглецюванням і пришвидшенням рекристалізації за наводнювання [1].

Оскільки воднева проникність сталі 10Х9ВФА зі зварним швом перевищує екологічно безпечний рівень  $P_c$  (див. рис. 4а, політерма 4), то для зниження цієї характеристики застосовували циклічне окисдування. Встановлено, що таке модифікування поверхні знижує  $P$  водню у 150 разів, що нижче екологічно небезпечного рівня. Сталь Х12Г20В зі зварним швом задовольняє умови роботи енергетичного обладнання без додаткового модифікування поверхні.

Розраховані значення проникності тритію крізь досліджені зварні з'єднання реакторних сталей за температури 873 К рівні [11–14]: сталь 10Х9ВФА –  $3,1 \cdot 10^{-10}$ , сталь 10Х12Г20В –  $5,7 \cdot 10^{-11}$  і сталь 25Х12Г20В –  $3,8 \cdot 10^{-12} \text{ mol/(m·s·Pa}^{1/2}\text{)}$ .

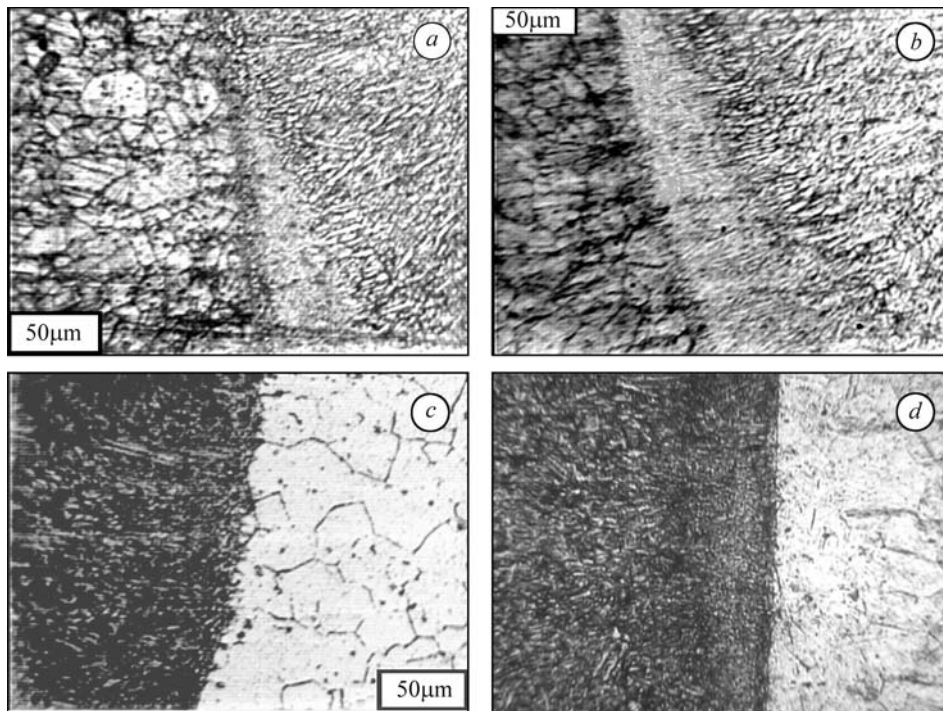


Рис. 5. Мікроструктура зварного з'єднання сталей 10X9ВФА(*a, b*) і X12Г20В (*c, d*) після відпалу у вакуумі (*a, c*) та водні (*b, d*).  $T = 873 \text{ K}$ ,  $\tau = 10 \text{ h}$ .  $\times 200$ .

Fig. 5. Microstructure of 10X9ВФА (*a, b*) and X12Г20В (*c, d*) steels after vacuum (*a, c*) and hydrogen (*b, d*) annealing.  $T = 873 \text{ K}$ ,  $\tau = 10 \text{ h}$ .  $\times 200$ .

**РЕЗЮМЕ.** Исследована водородопроницаемость реакторных сталей 12X18H10T, 316 SS, 10X9ВФА и легированных хромомарганцевых сталей ЕП-838 и X12Г20В в исходном состоянии, после термообработки, легирования, нанесения защитных покрытий и оксидирования, облучения ионами  $\text{H}^+$  и при наличии сварных соединений. Рассчитано проникание водорода  $P_c$ , соответствующее экологически безопасному уровню потерь трития сквозь реакторное оборудование во внешнюю среду, и показано, как изменение структуры и модифицирование поверхности согласуется с этой величиной. Определена проникаемость и растворимость водорода и трития в сварных соединениях исследуемых сталей.

**SUMMARY.** Hydrogen permeability of the 12X18H10T, 316 SS and 10X9ВФА reactor steels, as well as of the alloyed ЕП-838 and X12Г20В chromium-manganese steels has been studied in the initial state, after heat treatment, alloying, application of protective coatings and oxidation, irradiation by  $\text{H}^+$  ions and in the presence of welding joints. The calculated value of hydrogen flow, corresponds to the environment-friendly level of titanium loss through reactor equipment into environment. The changes of structure have been shown to correlate with the flow value. The permeability and solubility of hydrogen and tritium in welded joints of steels under investigations have been determined.

1. Похмурський В. І., Федоров В. В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1998. – 208 с.
2. Гельд П. В., Рябов Р. А. Водород в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1974. – 274 с.
3. Effect of hydrogen treatment on structure and phase state and hydrogen permeability of low-activation 10Cr12Mn20W and 10Cr9WVA steels / E. V. Dyomina, V. V. Fedorov, L. I. Ivanov et al. // J. Fusion Engineering and Design. – 2000. – № 51–52. – P. 93–98.
4. Лине́йный резонансный ускоритель протонов “Уран” для прикладных целей / О. А. Вальднер, В. Ф. Гасс, А. А. Глазков и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 5. – С. 31–34.



5. *Hydrogen permeability over the joint weld of the steel parts of fusion reactor with magnet confinement of plasma* / V. V. Fedorov, E. V. Dyomina, T. M. Zasadny et al. // *J. Nuclear Materials*. – 2002. – **307–311**(0). – P. 1498–1501.
6. *Новости термоядерных исследований в СССР. Экспресс-информация* / Под ред. К. Б. Карташова. – М.: Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова, 1983. – 28 с.
7. *Воднева проникність реакторних сталей ЕП-838 і Х12Г20В після легування та термічної обробки* / В. В. Федоров, Р. І. Королюк, Т. М. Засадний, Я. М. Іванів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2000. – № 4. – С. 49–54.  
(*Fedorov V. V., Korolyuk R. I., Zasadnyi T. M., and Ivaniv Ya. M. Hydrogen Permeability of EP-838 and Kh12G20V Reactor Steels after Alloying and Thermal Treatment // Materials Science*. – 2000. – № 4. – P. 527–533.)
8. *Воднева проникність протонно-опромінених реакторних сталей з оксидними плівками* / В. В. Федоров, Т. М. Засадний, Р. І. Королюк, О. О. Балицький // *Там же*. – 2000. – № 5. – С. 59–63.  
(*Fedorov V. V., Zasadnyi T. M., Korolyuk R. I., and Balyts'kyi O. O. Hydrogen Permeability of Proton-Irradiated Reactor Steels with Oxide Films // Materials Science*. – 2000. – № 5. – P. 701–713.)
9. *Effect of Hydrogen on Processes of Reactive Diffusion in a “Metal-Protective Coating” System* / V. V. Fedorov, E. V. Dyomina, T. M. Zasadny et al. // *J. Defect and Diffusion Forum*. – 2001. – **194–199**. – P. 1105–1110.
10. *Федоров В. В., Засадний Т. М., Королюк Р. І. Високотемпературна корозія феритних сталей реакторного призначення* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2000. – Спецвип. № 1. – С. 186–191.
11. *Федоров В. В., Засадний Т. М. Вплив модифікування поверхні на водневу проникність реакторних сталей і їх зварних з'єднань* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – № 5. – С. 33–38.  
(*Fedorov V. V. and Zasadnyi T. M. Effect of modification of the surface on the hydrogen permeability of reactor steels and their welded joints // Materials Science*. – 2009. – № 5. – P. 644–650.)
12. *Hydrogen permability over the joint weld of the steel parts of fusion reactor with magnet confinement of plasma* / V. V. Fedorov, E. V. Dyomina, T. M. Zasadny et al. // *10<sup>th</sup> Int. Conf. on Fusion Reactor Materials. Collected Abstracts*. – Germany: Baden-Baden, 2001. – P. 338.
13. *Hydrogen permeability over the joint weld of the low-activation Cr12Mn20W and 10Cr9WVA steels with oxide coating films* / V. V. Fedorov, E. V. Dyomina, L. I. Ivanov et al. // *11<sup>th</sup> Int. Conf. on Fusion Reactor Materials. Collected Abstracts*. – Japan: Kyoto, 2003. – P. 296.
14. *Оцінка водневої проникливості малоактивованих реакторних сталей зі зварними швами* / Є. В. Дьоміна, Т. М. Засадний, М. Д. Прусакова, В. В. Федоров // *Наук. нотатки*. – 2007. – № 20. – С. 159–163.

*Одержано 30.11.2010*