

## ВОДНЕВА ПРОНИКНІСТЬ СТАЛЕЙ АТОМНОЇ ТА ТЕРМОЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**Федоров В.В.,**

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

**Дьоміна Є.В., Прусакова М.Д.,**

*Інститут металургії і матеріалознавства ім. А.А.Байкова РАН, м. Москва, Росія*

**Іваницький Р.І.,**

*Тернопільський національний педагогічний університет ім. В.Гнатюка,*

**Засадний Т.М.**

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

*У роботі досліджено водневу проникність реакторних сталей 12X18H10T, 316SS, 10X9BFA і легованих хромомарганцевих сталей ЕП-838 і X12Г20В у вихідному стані, після термообробки, легування, нанесення захисних покриттів і окисдування, опромінення іонами H<sup>+</sup> та за наявності зварних з'єднань. Розраховано потік водню P<sub>с</sub>, який відповідає екологічно безпечному рівню втрат тритію крізь реакторне обладнання у довкілля, і показано як зміна структури і модифікування поверхні узгоджуються з його величиною. Визначено проникність і розчинність водню та тритію у зварних з'єднаннях досліджуваних сталей.*

*Ключові слова: водень, тритій, воднева проникність, розчинність, коефіцієнт дифузії.*

**Вступ.** Найчастіше вузли реакторів та труби теплообмінника в енергетичних установках виготовляють із нержавіючих аустенітних, хромомарганцевих та феритно-мартенситних сталей, недоліком яких є висока газопроникність. Тому забезпечення низьких значень водневої проникності 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 у цьому випадку мають вигляд :

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

де P – коефіцієнт водневої проникності, D – коефіцієнт дифузії, S – розчинність водню, E<sub>P</sub> та E<sub>D</sub> – енергії активації відповідних процесів, H<sub>S</sub> – теплота розчинення, P<sub>0</sub>, D<sub>0</sub> і S<sub>0</sub> – передекспоненційні множники. Розчинність водню розраховували за формулою  $S = P/D$ , де P і D визначали в одному експерименті.

Слід відзначити, що не обов'язково проводити безпосередні вимірювання проникання радіоактивного тритію, 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 [2], тобто можна розрахувати втрати тритію, визначивши швидкість проникання водню. Згідно вказаного ефекту та умови, що рівень радіаційної безпеки при

роботі термоядерної енергетичної установки не повинен перевищувати 1 Кюрі в день, розраховали критичне значення  $P_c = 2,4 \cdot 10^{-12}$  моль / м·с · Па<sup>1/2</sup> [1], порівняння якого з проникністю водню крізь реакторні сталі вказує на необхідність її зменшення від 6 до 200 разів [3], що можна досягнути легуванням, хіміко-термічною обробкою або нанесенням відповідних захисних покриттів чи плівок. Необхідно також враховувати проникання водню крізь зварні з'єднання та вплив іонного опромінювання.

У роботі узагальнені результати вивчення водневої проникності реакторних сталей та її зміни під впливом вказаних вище чинників, отримані у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. Об'єктом дослідження вибрали хромомарганцеві сталі ЕП-838 і Х12Г20В з різними системами легування та феритно-мартенситну сталь 10Х9ВФА, розроблені в Інституті металургії і матеріалознавства ім. А. А. Байкова РАН (Росія) (табл. 1). Для порівняння дослідили аустенітні нержавні сталі 12Х18Н10Т і 316SS (виробництво США, вітчизняний аналог 06Х17Н12М2ГС).

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних реакторних сталей

Сталь	Fe	Cr	Mn	W	Mo	Si	Ni	Al	Ti	C	Sc
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	–
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
Х12Г20В	Осн.	12,0	20,2	0,95	–	0,33	–	–	0,08	0,10	–
Х12Г20В (плавка 1)	Осн.	12,5	20,3	0,95	–	0,43	–	–	0,08	0,10	–
Х12Г20В (плавка 2)	Осн.	12,5	20,7	0,95	–	0,57	–	–	0,08	0,11	0,1
Х12Г20В (плавка 3)	Осн.	12,2	20,8	1,00	–	0,37	–	–	0,11	0,26	–
Х12Г20В (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	–

**Методики проведення експерименту.** Проникність водню крізь зразки – мембрани товщиною 1-2 мм і діаметром 25-30 мм визначали об'єметричним методом із застосуванням автоматизованого манометра Мак-Леода [1]. Експерименти проводили за ступінчатого охолодження з кроком 100 К в інтервалі температур 1173-573 К. Статистична обробка отриманих результатів показала, що точність визначення проникності водню складає 4-6%.

Поверхню зразків модифікували нанесенням оксидних плівок і захисних покриттів. 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 нестійкі оксидні фракції і, розчиняючись у сталях, пришвидшує перерозподіл легувальних елементів [1]. Створені таким чином захисні плівки стійкі до дії водню за температур до 973-1023 К, а також поліпшують жаротривкість залізохромистих сталей. Як захисні покриття від наводнювання застосовували інтерметаліди берилію [4], які наносили на зразки газотермічним методом.

Вплив імплантованих протонів на водневу проникність сталей вивчали на зразках, опромінених в установці «Уран» [5], використовуючи протонні пучки енергією 1 МеВ за густини іонного струму 40 мА/м<sup>2</sup>, що дало можливість досягти флюенса 10<sup>20</sup> іон/м<sup>2</sup>. За такої обробки фазово-структурний стан реакторних матеріалів еквівалентний десятирічній реальній експлуатації термоядерного реактора на дейтерій-тритієвій плазмі з відповідною концентрацією імплантованого водню.

Розчинність водню у зварних з'єднаннях сталей визначали за співвідношенням  $S = P / D$ , 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 [6]. Застосовували лазерне зварювання у гелієвій атмосфері, використовуючи лазер ТЛ-5М, який за потужності випромінювання 2,5 кВт дає можливість зварювати зі швидкістю 66 мм / с.

Для встановлення зміни фазово-структурного стану реакторних сталей після взаємодії з воднем проводили рентгеноструктурний, металографічний і мікрорентгеноспектральний аналізи.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Дослідження водневої проникності реакторних сталей, які використовуються, а також пропонуються для застосування як матеріал першої стінки реактору, проводили за умов, найбільш наближених до реальних [7]. Крім того, для встановлення взаємозв'язку між зміною фазово-структурного стану і дифузійних параметрів водню вимірювання проводили в широкому інтервалі температур (573-1173 К), застосовуючи проміжну термічну обробку у водні [1, 8].

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 год. у вакуумі і водні. Аналогічний результат отримано і для сталі 316 SS (політерма 2). У випадку хромомарганцевої сталі ЕП-838 встановлено, що її термічна обробка у водні впродовж 5-8 год. ( $T = 900-980$  К) змінює її фазово-структурний стан внаслідок формуванням збагачених марганцем мікрообластей типу  $Fe_3Mn$  і зменшує водневу проникність нижче 983 К (температура поліморфного  $\alpha \leftrightarrow \beta$  перетворення у фазі  $Fe_3Mn$ ). При цьому внаслідок збіднення матриці Mn одночасно в аустенітній матриці сталі формуються виділення областей  $\alpha$ -заліза. Встановлено, що за тиску водню 0,1 МПа процес такого фазоутворення завершується через 40 год. Однак отримане зменшення

потоків водню після водневої термообробки (політерми 3 і 4) є недостатнім, оскільки перевищує екологічно безпечний коефіцієнт проникання  $P_c$  в інтервалі 773-973 К (пунктир на рис. 1).

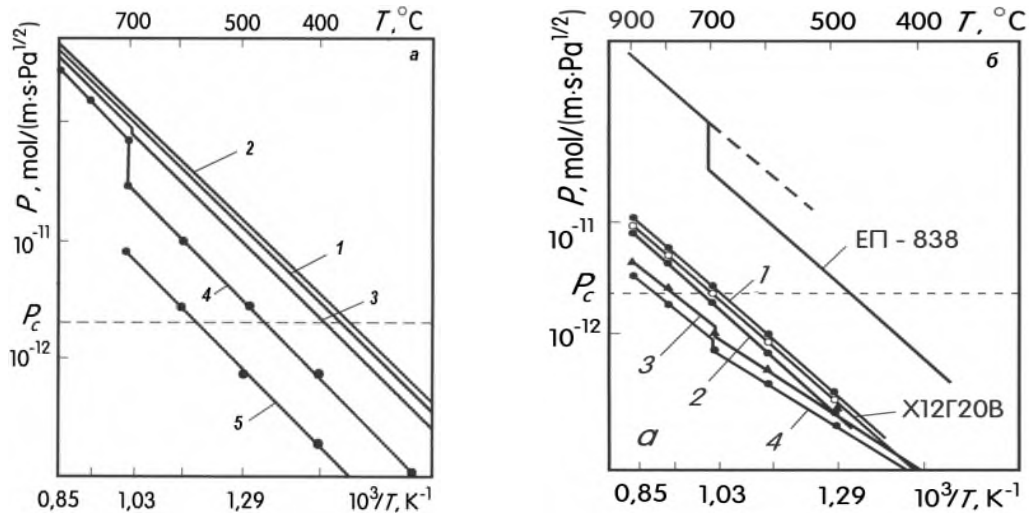


Рисунок 1 – Воднева проникність досліджуваних сталей: (а) 1 – 12Х18Н10Т, 2 – 316 SS, 3, 4 – ЕП-838 до та після водневої обробки, 5 – ЕП-838, легована церієм після водневої обробки і (б) – легована сталь Х12Г20В (номера політерм відповідають номеру плавки з табл. 1) [3, 8]

Для забезпечення необхідного рівня фізико-механічних характеристик та стійкості до радіаційного розпухання під опроміненням реакторні сталі легують металами III-IV груп та рідкісноземельними елементами (РЗМ). Дослідження водневої проникності крізь сталь ЕП-838 (табл. 1, плавки 2-4) показали, що у зразках, легованих скандієм, фазовий перехід при 983 К відсутній. Однак у зразках сталі ЕП-838, легованих церієм 0,01 мас.% (табл. 1, плавка 1) воднева обробка ( $T = 900 \text{ K}$ ,  $\tau = 5 \text{ год.}$ ) приводить до ще більшого зменшення водневої проникності (рис. 1а, політерма 5), що задовільняє вимогам експлуатації першої стінки ТЯР (див. штрихову лінію на рис. 1а). Очевидно, це зумовлено тим, що Се є гідридоутворюючим елементом і, взаємодіючи з воднем, зменшує його дифузійну рухливість [1].

Найважливішим наслідком збільшення концентрації Mn за рахунок Ni при переході від сталі ЕП-838 до сталі Х12Г20В (табл. 1) є зниження водневої проникності у 8-12 разів, яке задовольняє вимогам екологічної безпеки (рис. 1б). При цьому легування сталі Х12Г20В скандієм зменшує потік водню (політерма 2), а збільшення вмісту вольфраму і титану не тільки знижує водневу проникність (політерми 3 і 4), але й підвищує на 15-20% міцнісні характеристики. Поява у цьому випадку зламів на політермах проникання водню при 983 К зумовлена збільшенням вмісту вуглецю, який зв'язує легуючі елементи у карбіди, сприяючи утворенню інтерметалідів  $\text{Fe}_3\text{Mn}$  на межах зерен та виділенню мікрообластей  $\alpha$ -заліза в аустенітній матриці сталі [8], що підтверджено металографічним та мікрорентгеноспектральним аналізами.

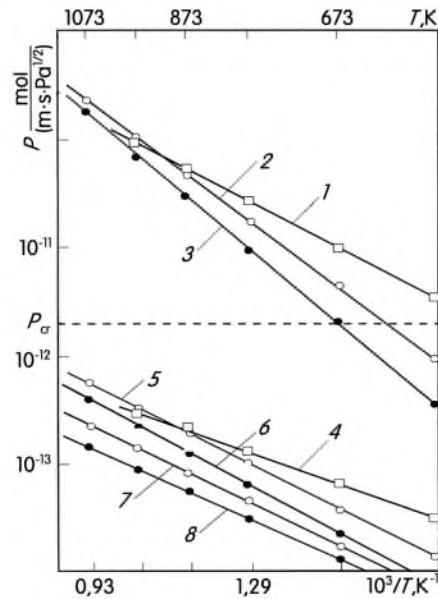


Рисунок 2 – Політерми водневої проникності сталей 10X9ВФА (1, 4), ЕП-838 (2, 5, 7) та 12X18Н10Т (3, 6, 8) у вихідному стані (1-3), після циклічного оксидування (4-6) та опромінення іонами  $H^+$  (7, 8) [8, 9]

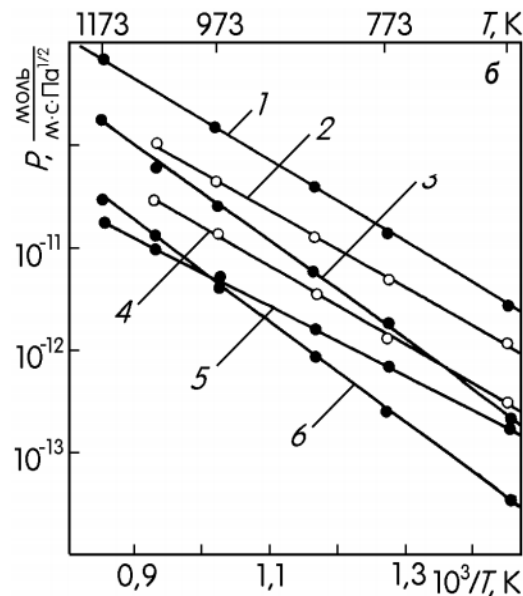


Рисунок 3 – Воднева проникність сталі 12X18Н10Т з захисними покриттями: 1 – вихідний зразок, 2 – покриття «БМ», 3 –  $Al_2O_3 + Al$ , 4 – покриття «БКН», 5 –  $Ni + Mo + Al$  [1], 6 – двостороннє борування) [1]

Циклічне оксидування сталей 10X9ВФА, ЕП-838 та 12X18Н10Т зменшує водневу проникність у 120–160 разів, а енергію активації проникання на 30%. 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 нижче екологічно безпечного рівня  $P_c$ .

Одностороннє опромінення зразків досліджуваних сталей протонами незначно зменшує водневу проникність, що можна пояснити згладжуванням

мікрорельєфу поверхні. Суттєво посилює ефект двостороннє опромінення, яке знижує потік водню майже вдвічі. Критична температура термодесорбції імплантованого водню зі сталей 12Х18Н10Т, ЕП-838 і 10Х9ВФА знаходиться в інтервалі 600-640 К, що підтверджено даними вимірювання електроопору і мікротвердості [4]. Крім того, після імплантації протонів бар'єрна дія проникання водню оксидів зі шпінельною структурою посилюється, а енергія активації процесу зменшується (рис. 2, політерми 7 і 8).

У зв'язку з проблемою захисту реакторного обладнання від наводнювання дослідили інтерметалічні берилієві покриття та особливості їх деградації у середовищі водню [4]. Покриття двох типів: «БМ» (Be+Mo) та «БКН» (Be+Cu+Ni) наносили на зразки зі сталі 12Х18Н10Т газотермічним методом. Встановлено, що при значній різниці в товщинах («БМ» – 25 мкм, «БКН» – 2,5 мкм) ефект бар'єрної дії останнього у два рази вищий (рис. 3, політерми 2 і 4), що, згідно з металографічним аналізом, є наслідком більшої його щільності та гомогенності. Порівняння отриманих результатів з найживанішими захисними покриттями [1] показало, що покриття «БКН» інтенсивніше знижує швидкість проникання водню, ніж плазмове композиційне покриття  $Al_2O_3+Al$  (політерма 3) і за своїм впливом співмірне з композиційним покриттям Ni+Mo+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 мкм («БКН» лише 2,5 мкм). Крім того, у водні боридне покриття впродовж 30-40 год. розсмоктується [1], на відміну від покриття «БКН», яке за таких же умов практично не деградує.

Таблиця 2 – Дифузійні параметри водню в досліджуваних сталях і їх зварних з'єднаннях при  $T=873$  К [11]

СТАЛЬ	$P_o$ , мол $m \cdot c \cdot Pa^{1/2}$	$E_p$ , кДж мол	$D_o$ , $m^2$ с	$E_D$ , кДж мол	$S_o$ , мол $m^3 \cdot Pa^{1/2}$	$H_s$ , кДж мол
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

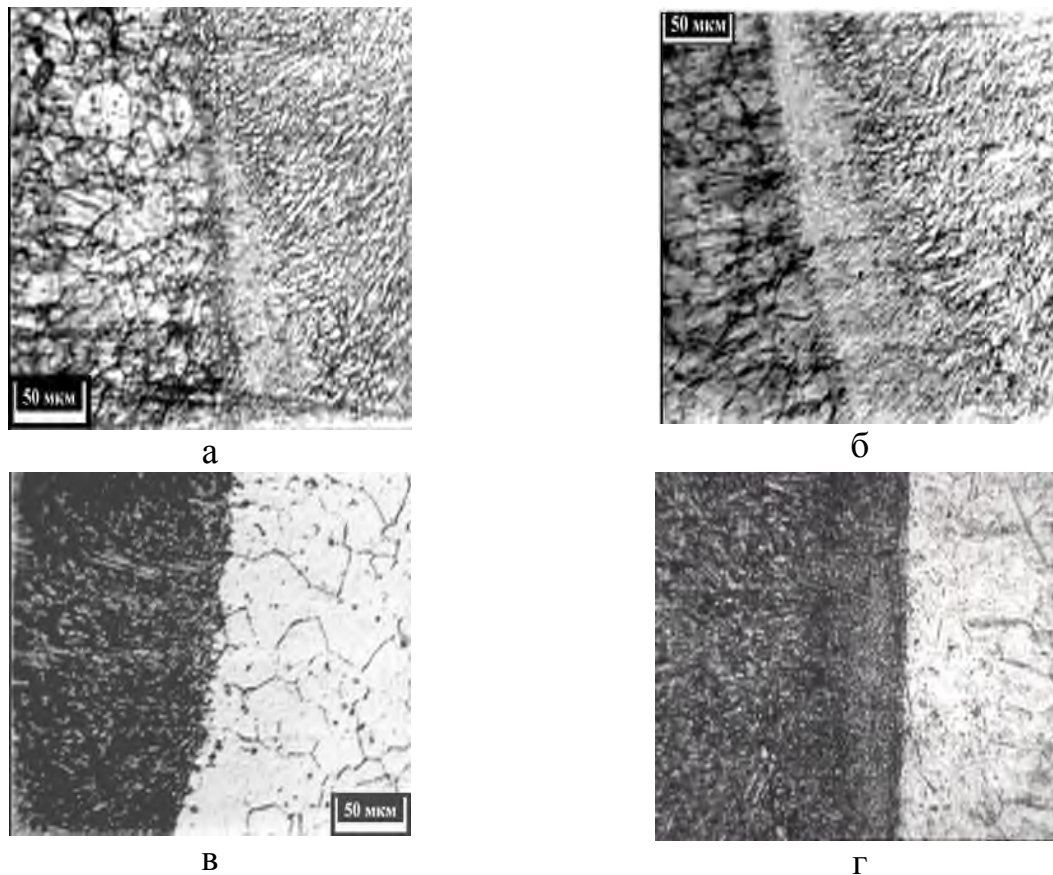


Рисунок 4 – Мікроструктура зварного з'єднання сталей 10X9ВФА(а,б) і X12Г20В (в, г) після відпалу у вакуумі (а, в) і водні (б, г) [12].  $T = 873 \text{ K}$ ,  $\tau = 10 \text{ год.}$ ,  $\times 200$

Відомо, що основна частка втрат водню та його ізотопів у зовнішнє середовище під час роботи реактора припадає на зварні з'єднання сталей. У проведених нами дослідженнях [9-12] зварний шов у зразках-мембранах отримували, роблячи розріз зразка лазером ЛТ-5М, який після цього ним же заварювали за меншої потужності. Значення коефіцієнта дифузії водню для досліджуваних сталей в основному металі і самому зварному шві розраховували на основі кінетичних залежностей зміни електроопору за наводнювання в інтервалі температур 773-1073 К за методикою, описаною в [1]. З метою перевірки точності цієї методики, порівнювали експериментально отримані (метод проникання) і розраховані коефіцієнти дифузії водню за температури 873 К. Встановлено, що для основного металу, наприклад, сталі 10X9ВФА, вони практично співпадають –  $D_{873 \text{ K}} = (9,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ . Оскільки наявність зварного шва призводить до зростання водневої проникності, яке пропорційне співвідношенню площ зварного шва  $S_1$  і основного металу  $S_2$  зразка-мембрани ( $P_2/P_1 = (S_1+S_2)/S_2$ ), то це дає змогу розрахувати проникність самого зварного шва і, на основі отриманих значень коефіцієнта дифузії, визначити у ньому розчинність водню. Отримані результати наведені у табл. 2, з якої можна зробити висновок, що найменшу проникність і розчинність водню має зварний шов

сталі Х12Г20В (фізичний зміст приведених у табл. 2 параметрів дифузії наведений у вступі до статті).

Дослідження впливу термічної обробки у вакуумі та водні ( $T=873$  К,  $\tau = 10$  год.) на мікроструктуру зварних з'єднань сталей 10Х9ВФА і Х12Г20В показали (рис. 4), що зона термічного впливу на границі розділу основний метал – зварний шов має дрібнозеренну структуру і за наявності розчиненого водню зростає, що можна пояснити водневим знеуглецьовуванням і пришвидшенням рекристалізації за наводнювання [1].

Оскільки воднева проникливість сталі 10Х9ВФА зі зварним швом перевищує екологічно безпечний рівень  $P_c$ , то для її зменшення застосовували циклічне оксидування. Встановлено, що таке модифікування поверхні знижує  $P$  водню у 150 разів, що нижче екологічно небезпечного рівня. Сталь Х12Г20В зі зварним швом задовільняє безпечним умовам роботи енергетичного обладнання без додаткового модифікування поверхні. На основі отриманих залежностей зміни водневої проникності розраховані значення проникності тритію крізь досліджені зварні з'єднання реакторних сталей, які за температури 873 К рівні: сталь 10Х9ВФА –  $3,1 \cdot 10^{-10}$ , сталь 10Х12Г20В –  $5,7 \cdot 10^{-11}$  і сталь 25Х12Г20В –  $3,8 \cdot 10^{-12}$  мол/м·с·Па<sup>1/2</sup>.

**Висновки.** Встановлено, що термообробка у водні ініціює у сталях ЕП-838 і Х12Г20В формування мікрообластей, збагачених марганцем, що призводить до зменшення водневої проникності. Показано, що легування РЗМ понижує водневу проникність реакторних сталей.

Встановлено, що температура термодесорбції імплантованих атомів водню з досліджених реакторних сталей складає 600-640 К.

Із досліджень впливу оксидування на водневу проникність реакторних сталей слідує – чим більший вміст хрому у сталі, тим менша її воднева проникність після циклічного оксидування. Встановлено, що бар'єрна дія прониканню водню оксидів зі шпінельною структурою після імплантації протонів посилюється. Звідси можна зробити висновок, що протонне опромінення не відновлює такі оксиди, а підвищує їх гомогенність та адгезію.

Для запобігання втрат водню і його ізотопів під час експлуатації енергетичного обладнання найперспективнішими є захисні покриття на основі інтерметалідів берилію.

Вперше розрахована проникність тритію крізь зварні з'єднання реакторних сталей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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. 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. – Vol. 194-199. – P. 1105-1110.

5. Линейный 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.

6. 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. – V. 307-311(0). – P. 1498-1501.

7. Новости термоядерных исследований в СССР. Экспресс-информация / Под ред. К. Б. Карташова. – М. : Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова, 1983. – Вып. 1 (27). – 28 с.

8. Воднева проникність реакторних сталей ЕП-838 і Х12Г20В після легування та термічної обробки / В. В. Федоров, Р. І. Королюк, Т. М. Засадний та інші // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – №4. – С. 49-54.

9. 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.

10. 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> International Conference on Fusion Reactor Materials. Collected Abstracts. – Germany : Baden-Baden, 2001. – P. 338.

11. 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> International Conference on Fusion Reactor Materials. Collected Abstracts. – Japan : Kyoto, 2003. – P. 296.

12. Оцінка водневої проникливості малоактивованих реакторних сталей зі зварними швами / Є. В. Дьоміна, Т. М. Засадний, М. Д. Прусакова, В. В. Федоров // Наукові нотатки. – 2007. – №20. – С. 159-163.

**Фёдоров В.В., Дёмина Е.В., Прусакова М.Д., Иваницкий Р.И., Засадный Т.М.**  
**ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ АТОМНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ**  
**ЭНЕРГЕТИКИ**

*Исследована водородопроницаемость реакторных сталей 12X18H10T, 316SS, 10X9BΦA и легированных хромомарганцевых сталей ЕП-838 и X12Г20В в исходном состоянии, после термообработки, легирования, нанесения защитных покрытий и окисления, облучения ионами H<sup>+</sup> и при наличии сварных соединений. Рассчитан поток водорода P<sub>с</sub>, соответствующий экологически безопасному уровню потерь трития сквозь реакторное оборудование во внешнюю среду, и показано как изменение структуры и модифицирование поверхности согласуется с его величиной. Определена проницаемость и растворимость водорода и трития в сварных соединениях исследуемых сталей.*

*Ключевые слова: водород, тритий, водородопроницаемость, растворимость, коэффициент диффузии.*

**Fyodorov V.V., Dyomina E.V., Prusakova M.D., Ivanytsky R.I., Zasadny T.M.**  
**HYDROGEN PENETRATION CAPACITY OF STEELS OF NUCLEAR AND**  
**THERMONUCLEAR ENERGETICS**

*Hydrogen penetration capacity of 12X18H10T, 316SS and 10X9BΦA reactor steels, as well of alloyed ЕП-838 and X12Г20В chromium-manganese steels in initial state has been studied, after heat treatment, alloying, application of protective coatings and oxidation, irradiation by H<sup>+</sup> ions and in the presence of welding joints. The calculated value of hydrogen flow P<sub>с</sub>, which corresponds to ecologically safe level of losses of tritium through reactor equipment into environment. The change of structure and how the modification of the surface corresponds with its value is shown as well. Hydrogen penetration capacity and hydrogen and tritium solubility in welded joints of steels studied have been determined.*

*Keywords: hydrogen, tritium, hydrogen penetration capacity, solubility, diffusion factor.*