

Оцінювання водневої крихкості високолегованих хромо-нікелевих сталей та сплавів у водні за високих тисків і температур

О. І. Балицький¹, Л. М. Іваськевич

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

¹ balitskii@ipm.lviv.ua

Виявлено існування двох температурних екстремумів водневої крихкості жароміцних аустенітних сталей і сплавів з інтерметалідним зміцненням (низько- та високотемпературне) в інтервалі 293...1073 К. Низькотемпературний мінімум їх властивостей у водні на 250...300 градусів вищий, ніж мартенситних та гомогенних аустенітних сталей. Високотемпературний максимум водневої крихкості проявляється при 1073 К у сталях та сплавах з інтерметалідним зміцненням та низьким вмістом тугоплавких елементів (Mo, Nb, W), які сповільнюють фазові перетворення у процесі випробувань. За температури 293 К дія зовнішньої водневої атмосфери та внутрішнього заздалегідь поглиненого водню визначається структурним класом і вмістом нікелю в матеріалі. Ступінь окрихчування сплавів на основі нікелю (56 і більше ваг.% Ni) та мартенситних жароміцних сталей визначається тиском газоподібного водню, а додаткова дія внутрішнього попередньо абсорбованого водню відчутна лише за невеликого тиску. Характеристики пластичності і малоциклової довговічності аустенітних сталей (23...28 ваг.% Ni) погіршуються лише після попереднього наводнення і мало змінюються зі зростанням тиску водневої атмосфери, а залізонікелевий сплав (43 ваг.% Ni) чутливий до дії зовнішнього та внутрішнього водню. Установлено існування межі водневої деградації – гранично мінімальних значень показників роботоздатності сталей та сплавів (відносні видовження і поперечне звуження, число циклів до руйнування), які не знижуються зі зростанням тиску адсорбованого та вмісту поглиненого водню, зменшенням швидкості і частоти навантаження. Такі значення механічних характеристик мартенситних сталей та сплавів на нікелевій основі досягаються за тисків водню понад 10 і 30 МПа, а аустенітних дисперсійно твердіючих сталей і сплавів – за його вмісту 15 і 30 млн⁻¹ відповідно.

Ключові слова: короткочасна міцність та пластичність, малоциклова довговічність, жароміцні хромо-нікелеві сталі та сплави, воднева крихкість.

Вступ. Воднева крихкість конструкційних матеріалів – одна з важливих проблем фізико-хімічної механіки матеріалів. Її суть полягає у тому, що у водневому середовищі метали втрачають пластичність, має місце крихке руйнування за значно менших навантажень, ніж в умовах інертного середовища [1–6]. Залежно від структурного стану матеріалу, способу і виду навантаження (короткочасне чи тривале, статичне чи циклічне), параметрів водневого середовища та температури водень може по-різному впливати на конструкційну міцність металевих виробів.

Ступінь водневої крихкості металів залежить від таких параметрів: форми і розмірів зразка, виду та швидкості навантаження, тиску водню, температури і чистоти водневої атмосфери. У випадку неідентичності одного чи декількох із цих чинників можна отримати різні, часом суперечливі результати [4–8]. Незважаючи на багаторічні дослідження, на сьогодні не сформульовано єдиних методичних вимог до проведення експериментів у водневому середовищі, зокрема на короткочасний розтяг та малоциклову утому [7–12].

Умови роботи устаткування водневої енергетики передбачають статичні і циклічні навантаження деталей в широкому температурному інтервалі [1–4, 7–12], а відомі з літературних джерел дані про температурні залежності механічних характеристик у водні обмежені та неоднозначні. Згідно з даними робіт [1, 2, 4, 5] за коротко-

часного статичного розтягу та малоциклової втоми верхня температура окрихчення сталей у середовищі водню становить 573 К. Водночас у наших та деяких дослідженнях інших авторів виявлено суттєве зменшення характеристик пластичності жароміцних нікелевих сплавів під дією водню за температури 1073 К і тиску 35 МПа [1, 2, 10–14]. Окрім того, недостатньо вивчено вплив абсорбованого матеріалом у процесі високотемпературної експлуатації водню за кімнатної температури.

У даній роботі наведено результати досліджень впливу температури, тиску й вмісту водню на короточасну міцність, пластичність та малоциклову довговічність сталей і сплавів на основі нікелю у водневмісних газових середовищах у широкому інтервалі тиску та температури.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували матеріали, з яких виготовляють деталі, що використовуються у виробках енергетичного, нафтохімічного машинобудування та аерокосмічної техніки [3–5, 14, 15] для роботи у водневому середовищі. Хімічний склад сплавів, режими термічної обробки та механічні властивості за температури 293 К у гелії (ненаводнені зразки) та водні за тиску 35 МПа (зразки до вмісту водню 5 млн⁻¹ – сталь 15X12H2МВФАБ, 15 млн⁻¹ – сталі 10X11H23Т3МР та 10X15H27Т3МР, 19 млн⁻¹ – сплав ХН43БМТЮ і 24 млн⁻¹ – сплав ХН55МБЮ) наведено у таблиці. За структурою – це мартенситна сталь 15X12H2МВФАБ із вмістом залишкового аустеніту після оптимальної термічної обробки біля 10%, дисперсійно твердіючі аустенітні сталі 10X11H23Т3МР, 10X15H27Т3МР та сплави ХН43БМТЮ, ХН55МБЮ з різним співвідношенням вмісту заліза та нікелю, які зміцнюються карбідами та, головним чином, інтерметалідною γ' -фазою типу $(\text{Ni,Fe,Cr})_3(\text{Al,Ti,Nb})$ у загальній кількості до 6% (сталь 10X11H23Т3МР), 10% (сталь 10X15H27Т3МР, сплав ХН43БМТЮ) і 8% (сплав ХН55МБЮ).

На статичний розтяг зі швидкістю переміщення активного захвату в інтервалі $10^{-2} \dots 10^2$ мм/хв випробовували стандартні п'ятикратні гладкі циліндричні зразки з діаметром робочої частини 5 мм. Малоциклову довговічність (число циклів до руйнування N) під жорстким чистим віднульовим згином визначали у діапазоні тиску 0...35 МПа за амплітуди 1,6% з частотою 0,5 Гц на шліфованих плоских зразках із робочою частиною розміром 3×6×20 мм. Випробування проводили згідно з ГОСТ 9651-84 (ИСО 783-89) та ГОСТ 25.502-79 [16, 17].

Частину зразків витримували протягом 10 годин в атмосфері водню при 623 К та 35 МПа, наводнені та ненаводнені зразки випробовували у гелії і водні за тиску 35 МПа. Об'ємний вміст водню в металі визначали методом екстракції та за допомогою приладу Leko TCH 600. Чутливість до водневої деградації оцінювали за коефіцієнтом β , який визначали як співвідношення значень відповідних характеристик у водні та гелії, наприклад $\beta_\psi = \psi_{\text{H}} / \psi_{\text{He}}$ – коефіцієнт впливу водню на відносне поперечне звуження, яке найчутливіше до дії водню за короточасного статичного розтягу [1, 2, 12].

Оцінювання впливу умов навантаження на водневу крихкість матеріалів за кімнатної температури. Зі зменшенням швидкості статичного розтягу дія водневої атмосфери або внутрішнього заздалегідь абсорбованого водню спочатку посилюється, а після досягнення критичної швидкості властивості стабілізуються (рис. 1). За однакових умов дії водню швидкісний інтервал максимального окрихчення мартенситної сталі на два порядки ширший, ніж аустенітної, що корелює зі співвідношенням коефіцієнтів дифузії у матеріалах з об'єм- та гранецентричними ґратками [2, 6, 8] (рис. 1).

Всі подальші випробування на статичний розтяг проводили за швидкості навантаження 0,1 мм/хв.

Вплив тиску і вмісту водню на механічні властивості досліджували з метою визначення умов експериментів, які дозволять провести порівняльну оцінку робоздатності матеріалів різних структурних класів та способів зміцнення у водні. Відомо [1, 2, 8, 10–12], що вплив водню на механічні характеристики майже для всіх мате-

Хімічний склад, режими термічної обробки та механічні властивості досліджуваних сплавів за кімнатної температури на повітрі (над рискою) та у водні під тиском 35 МПа після попереднього наводнювання (під рискою)

Матеріал (хімічний склад, ваг.%)	Термічна обробка		$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	N, цикл
	Гартування	Відпуск, старіння					
15X12H2MBФАБ (0,15C; 0,5Si; 12Cr; 1,9Ni; 1,52Mo; 0,72W; 0,18V; 0,5Mn; 0,02N; 0,25Nb)	1393 К, 1 год	953 К, 2 год	$\frac{1080}{1060}$	$\frac{940}{950}$	$\frac{16}{4}$	$\frac{62}{10}$	$\frac{1029}{43}$
10X11H23T3MP (0,05C; 0,4Si; 11,4Cr; 23,2Ni; 1,48Mo; 2,98Ti; 0,62Al; 0,015B; 0,33Mn)	1373 К, 1 год	1000 К, 16 год + 923 К, 5 год	$\frac{1200}{1210}$	$\frac{880}{880}$	$\frac{29}{20}$	$\frac{47}{23}$	$\frac{3000}{1020}$
10X15H27T3MP (0,09C; 0,6Si; 15Cr; 27,11Ni; 1,41Mo; 1,92W; 2,85Ti; 0,29Al; 0,02B; 0,1Co)	1373 К, 1 год	1023 К, 16 год + 923 К, 10 год	$\frac{1270}{1240}$	$\frac{870}{880}$	$\frac{17}{10}$	$\frac{23}{10}$	$\frac{2277}{455}$
ХН43БМТЮ (0,005C; 0,18Si; 0,3V; 14,5Cr; 44Ni; 1,8Mo; 1,67Ti; 0,5Al; 2,7Nb)	1373 К, 1 год	1023 К, 10 год + 923 К, 10 год	$\frac{1160}{960}$	$\frac{780}{740}$	$\frac{25}{4}$	$\frac{38}{14}$	$\frac{2560}{614}$
ХН55МБЮ (0,05C; 0,23Si; 19,0Cr; 8,87Mo; 1,73Nb; 1,49Al; 12,0Fe; 0,02Cu; Ni – решта)	1323 К, 1 год	1000 К, 15 год + 923 К, 10 год	$\frac{1080}{970}$	$\frac{650}{660}$	$\frac{35}{5}$	$\frac{38}{19}$	$\frac{3200}{199}$

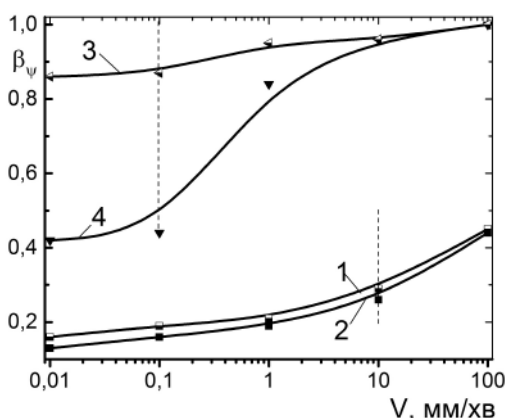


Рис. 1. Залежність коефіцієнта впливу водню на поперечне звуження β_{ψ} зразків із мартенситної сталі 15X12H2MBФАБ (1, 2) та аустенітної дисперсійно твердіючої сталі 10X15H27T3MP (3, 4) від швидкості розтягання при 293 К: 1, 3 – ненаводнені зразки; 2, 4 – наводнені зразки за 623 К, тиску водню 35 МПа протягом 10 годин (15X12H2MBФАБ – $C_H = 5$ млн⁻¹, 10X15H27T3MP – $C_H = 15$ млн⁻¹).

ріалів посилюється пропорційно квадратному кореню від тиску, причому діапазон такої залежності визначається хімічним складом та структурою матеріалу. За короткочасного статичного розтягу властивості вуглецевих сталей погіршуються лише в інтервалі тиску 0...10 МПа, тоді як окрихчення загартованих зразків зі сплаву Інконель-718 починається за тиску 10 МПа і посилюється аж до 70 МПа [3, 8, 12]. У всьому дослідженому діапазоні тиску (0...70 МПа) вплив водню на характеристики пластичності сталі та багатьох інших матеріалів зростає [2, 8, 10–12].

При випробуваннях на короткочасний статичний розтяг та малоциклову утому виявлено два типи залежності механічних властивостей від тиску водню. Один із них характерний для мартенситних сталей типу 15X12H2MBФAB (рис. 2) та високонікелевих сплавів (понад 55 ваг.% Ni) – рис. 3, коли за невеликого тиску водню пластичність і довговічність різко знижуються, а після досягнення тиску 10 МПа (мартенситні сталі) або 60 МПа (сплав ХН55МБЮ) його негативна дія стабілізується. Інший тип характерний для аустенітних дисперсійно твердіючих хромонікелевих сталей та сплавів типу 10X15H27T3MP (на рис. 4 криві 1, 3) та ХН43БМТЮ [10, 11, 18], властивості яких слабо знижуються зі збільшенням тиску і не досягають мінімальних значень навіть за 60 МПа. За відсутності заздалегідь абсорбованого водню пластичність сталі 10X11H23T3MP не погіршується у водневій атмосфері навіть за тиску 60 МПа та швидкості 0,01 мм/хв [10].

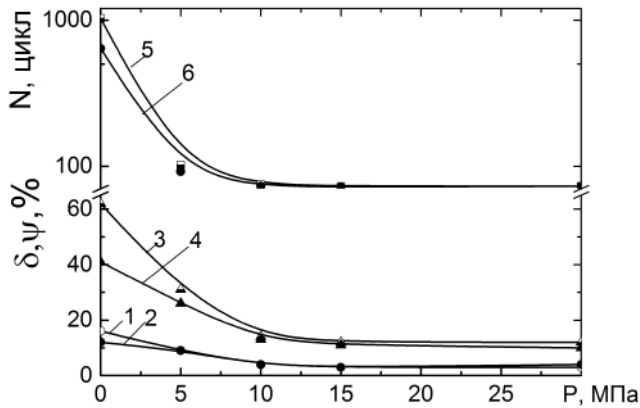


Рис. 2. Залежність відносного видовження δ (1, 2), поперечного звуження ψ (3, 4) ($V = 0,1$ мм/хв) і числа циклів до руйнування N (5, 6) ($\epsilon = 1,6\%$) зразків із мартенситної сталі 15X12H2MBФAB від тиску P водню при 293 К: 1, 3, 5 – ненаводнені зразки; 2, 4, 6 – наводнені зразки ($C_H = 5$ млн⁻¹).

У цьому випадку для повної оцінки чутливості до водневої крихкості зразки попередньо наводнювали, що імітувало тривалу експлуатацію деталей у водні. Додатковий ефект заздалегідь поглиненого водню є визначальним в окрихченні аустенітних дисперсійно твердіючих сталей та сплавів 10X11H23T3MP, ХН43БМТЮ [10, 11, 13], 10X15H27T3MP (рис. 4) і суттєвим для сплаву ХН55МБЮ (рис. 3). Вплив водню на механічні властивості сталей 10X11H23T3MP і 10X15H27T3MP посилюється з ростом його концентрації до 10...12 млн⁻¹ [10] та 13...14 млн⁻¹ відповідно (рис. 5), подальше збільшення C_H не викликає додаткового зменшення пластичності зразків.

Таким чином, за температури 293 К дія зовнішньої водневої атмосфери та внутрішнього заздалегідь поглиненого водню визначається структурним класом і вмістом нікелю в матеріалі. Ступінь окрихчення нікелевих сплавів ЕК-62 і ЕП-901 (56 і 60 ваг.% Ni) [10, 11] та мартенситних жароміцних сталей типу 15X12H2MBФAB і ЕП-810 визначається тиском газоподібного водню, а додаткова дія заздалегідь абсорбованого водню відчутна лише за невеликого тиску (рис. 2). Властивості сталей типу

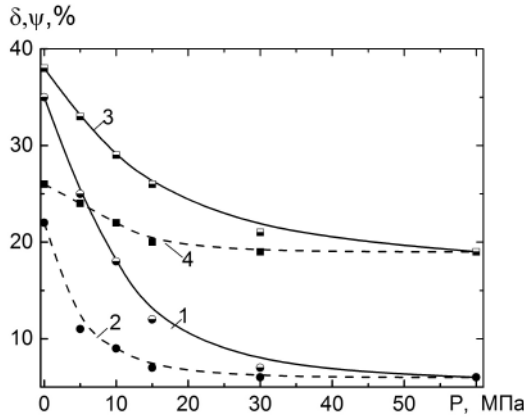


Рис. 3. Залежність характеристик пластичності δ (1, 2) і ψ (3, 4) нікелевого сплаву ХН55МБЮ від тиску P водню за швидкості деформації 0,1 мм/хв: 1, 3 – ненаводнені зразки; 2, 4 – наводнені зразки ($C_H = 24$ млн⁻¹).

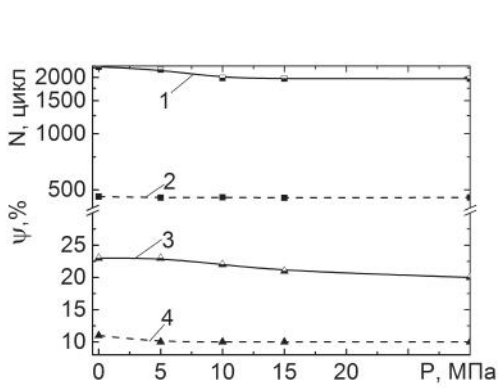


Рис. 4

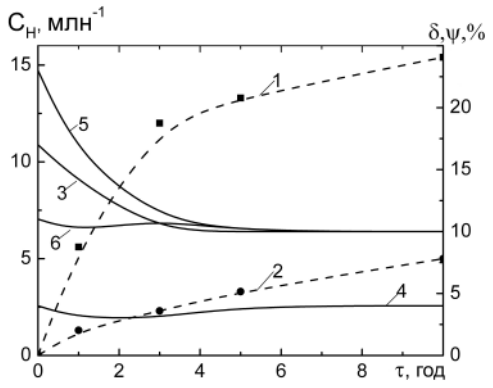


Рис. 5

Рис. 4. Залежність малоциклової довговічності N ($\epsilon = 1,6\%$) (1, 2) і відносного поперечного звуження ψ ($V = 0,1$ мм/хв) (3, 4) зразків з аустенітної сталі 10X15H27T3MP від тиску P водню: 1, 3 – ненаводнені зразки; 2, 4 – заздалегідь наводнені зразки ($C_H = 15$ млн⁻¹).

Рис. 5. Залежність концентрації абсорбованого водню C_H (1, 2), відносного видовження δ (3, 4) і відносного поперечного звуження ψ (5, 6) зразків зі сталей 15X12H2MBФАБ (2, 4, 6) і 10X15H27T3MP (1, 3, 5) у водні під тиском 35 МПа за $T = 293$ К ($V_{\text{деф}} = 6,7 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹) від часу наводнення (623 К, 35 МПа, H₂).

10X11H23T3MP та 10X15H27T3MP (23...28 ваг.% Ni) погіршуються лише після наводнення і мало змінюються зі зростанням тиску водневої атмосфери (рис. 4), а залізо-нікелеві сплави ХН43БМТЮ та ХН55МБЮ (43...55 ваг.% Ni) чутливі до дії зовнішнього водневого середовища та внутрішнього заздалегідь абсорбованого водню (рис. 3).

Отже, для оцінки роботоздатності мартенситних сталей та високонікелевих сплавів за характеристиками малоциклової втоми і короточасного статичного розтягу достатньо провести випробування у газоподібному водні за тиску понад 10 МПа, тоді як стабільні аустенітні хромонікелеві сталі та сплави з вмістом нікелю до 55% необхідно попередньо наводнювати [10, 11, 13]. Поглинений за підвищених температур водень максимально впливає на властивості досліджених залізонікелевих дисперсійно твердіючих сталей та сплавів при температурі 293 К за його вмісту 15...30 млн⁻¹, із подальшим наводненням окрихчення не збільшується [10, 11, 13]. Ці критичні значен-

ня концентрації водню для різних матеріалів різняться і визначаються, ймовірно, їх фазоструктурним складом, який залежить від вмісту нікелю, карбідів та інтерметалідів. Для мартенситних сталей швидкість деформації не повинна перевищувати 10 мм/хв ($6,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$), для сталей з аустенітною структурою – 0,1 мм/хв ($6,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$). За цих умов досягається межа водневої крихкості – мінімальні значення показників робото-здатності (пластичність, малоциклова довговічність), які не знижуються зі зростанням тиску абсорбованого та вмісту поглиненого водню.

Температурні залежності ступеня водневої крихкості залізонікелевих сплавів. Вплив температури на чутливість до дії водню за випробувань на статичний розтяг та малоциклову утому якісно однаковий, тому отримані закономірності проілюстровано на прикладі відносного поперечного звуження. Окрихчення мартенситних сталей у газоподібному водні максимальне за температури 300...500 К (на рис. 6 крива 1), дисперсійно твердіючої аустенітної сталі 10X15H27T3MP – за 470...800 К (на рис. 6 крива 2), а сплаву ХН43БМТЮ – за 370...970 К (на рис. 7 крива 3). Таким чином, вперше встановлено зміщення в область підвищених температур інтервалу окрихчення у водневій атмосфері аустенітних сталей з інтерметалідним зміцненням у порівнянні з мартенситними сталями. Відносне поперечне звуження ψ сталі 10X15H27T3MP максимально знижується (майже у два рази) у водні під тиском 35 МПа за 423 К, малоциклова довговічність N – у п'ять разів за 573 К. Після попереднього наводнювання зміцненого інтерметалідами аустеніту (сталь 10X15H27T3MP, сплав ХН43БМТЮ) максимум водневої крихкості зміщується до кімнатної температури (на рис. 6 крива 3, на рис. 7 крива 4).

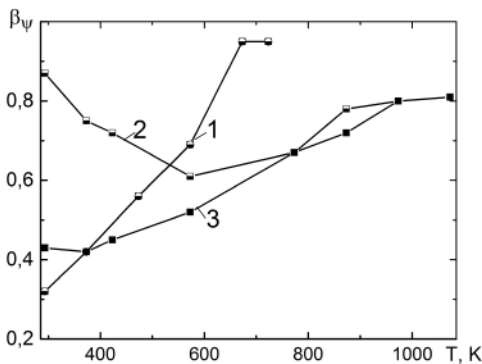


Рис. 6

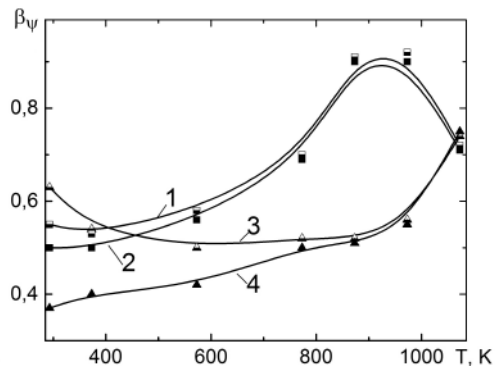


Рис. 7

Рис. 6. Температурна залежність коефіцієнта впливу водню на відносне поперечне звуження β_{ψ} ($V = 0,1$ мм/хв) сталей 15X12H2МВФАБ (1), 10X15H27T3MP (2, 3) за тиску водню 35 МПа: 1, 2 – ненаводнені зразки; 3 – наводнені зразки ($C_H = 15$ млн $^{-1}$).

Рис. 7. Температурна залежність коефіцієнта впливу водню на відносне поперечне звуження β_{ψ} ($V = 0,1$ мм/хв) сталей ХН43БМТЮ (1, 2), ХН55МБЮ (3, 4) за тиску водню 35 МПа: 1, 3 – ненаводнені зразки; 2, 4 – наводнені зразки ($C_H = 19$ і 24 млн $^{-1}$ відповідно).

Із підвищенням температури міцність мартенситної сталі різко зменшується, а її чутливість до дії водню знижується, і при 623 К властивості у водні та гелії практично однакові (на рис. 6 крива 1). Більш жароміцні сталь 10X15H27T3MP і сплав ХН43БМТЮ зберігають високу міцність до максимальної дослідженої температури 1073 К, за якої пластичність та малоциклова довговічність знижуються у водні на 20% (на рис. 6 криві 2, 3, на рис. 7 криві 3, 4). Температурні залежності коефіцієнтів впливу водню на характеристики сплаву ХН55МБЮ більш складні. Із підвищенням температури в інтервалі 773...973 К вплив водню на відносні видовження, поперечне звуження та довговічність зразків слабшає і посилюється за темпе-

ратури 1073 К (на рис. 7 криві 1, 2). Результати випробувань аустенітних дисперсійно твердіючих сталей та сплавів [7, 10, 11, 13] свідчать про існування декількох типів їх високотемпературної поведінки у водні. Один із них властивий матеріалам із невисоким вмістом тугоплавких елементів (сталь 10X11H23T3MP та сплав ХН55МБЮ). Тривалість розтягу зі швидкістю 0,1 мм/хв при температурі 1073 К у нейтральному середовищі сягає 2 годин, тобто є достатньою для коагуляції інтерметалідів [18–22], яка спричиняє інтенсивне розміщення і пластифікацію (на рис. 8 криві 3–6). Через зумовлені воднем процеси локалізації деформації міжзеренне руйнування зразків за 1073 К відбувається швидше, пластифікація відсутня, що проявляється в існуванні високотемпературної водневої крихкості сплаву ХН55МБЮ (на рис. 7 криві 1, 2). Інший тип характерний для сталі 10X15H27T3MP і сплаву ХН43БМТЮ з більшою кількістю Мо, Nb, W, міцність яких знижується менше з підвищенням температури, високотемпературна пластифікація за 1073 К відсутня (на рис. 8 криві 1, 2), відповідно вплив водню на їх пластичність монотонно зменшується в інтервалі температур 293...1073 К (на рис. 8 криві 7, 8), залишаючись при цьому досить значним [10, 11, 13].

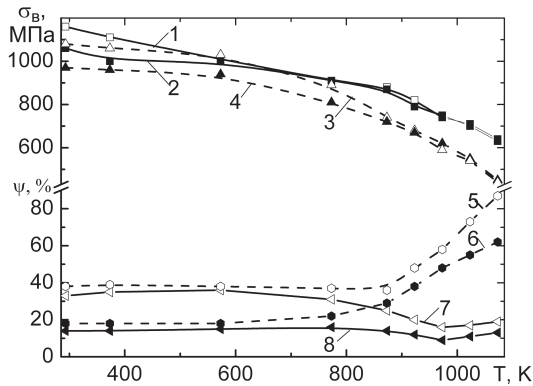


Рис. 8. Температурна залежність границі міцності σ_v (1–4) і відносного поперечного звуження ψ (5–8) сплавів ХН43БМТЮ (1, 2, 7, 8) і ХН55МБЮ (3–6) у гелії (1, 3, 5, 7) та водні за тиску 35 МПа після попереднього наводнення до вмісту водню 19 млн^{-1} (2, 4, 6, 8) ($V = 0,1 \text{ мм/хв}$).

Таким чином, в інтервалі температур 293...1073 К виявлено існування двох температурних максимумів водневої крихкості жароміцних аустенітних сталей і сплавів з інтерметалідним зміцненням – низько- та високотемпературне. Низькотемпературний мінімум механічних властивостей дисперсійно твердіючих аустенітних сталей і сплавів у водні розширюється від температур 293...573 К (характерно для мартенситних та гомогенних аустенітних сталей) до 800...970 К. Високотемпературна воднева крихкість проявляється при 1073 К у сталях і сплавах з інтерметалідним зміцненням та низьким вмістом тугоплавких легуючих елементів (Мо, Nb, W), які сповільнюють фазові перетворення у процесі випробувань.

Висновки

1. Установлено існування межі водневої деградації – мінімального значення показників робоздатності (пластичність, малоциклова довговічність), які не знижуються зі зростанням тиску абсорбованого та вмісту поглиненого водню. Такі гранично низькі значення механічних характеристик мартенситно старіючих сталей та високо-нікелевих сплавів (> 55 ваг.% Ni) досягаються за тисків водню понад 10 і 30 МПа відповідно, а стабільних аустенітних дисперсійно твердіючих сталей та сплавів (20...55 ваг.% Ni) – за вмісту заздалегідь абсорбованого водню $15...30 \text{ млн}^{-1}$.

2. В інтервалі температур 293...1073 К виявлено існування двох максимумів водневої крихкості жароміцних аустенітних сталей і сплавів з інтерметалідним зміцненням – низько- та високотемпературне. Низькотемпературний мінімум механічних властивостей дисперсійно твердіючих аустенітних сталей і сплавів у водні розширюється від температур 293...573 К (характерно для мартенситних та гомогенних аустенітних сталей) до 800...970 К. Високотемпературна воднева крихкість проявляється при 1073 К у сталях і сплавах з інтерметалідним зміцненням та низьким вмістом тугоплавких легуючих елементів (Mo, Nb, W), які сповільнюють фазові перетворення у процесі випробувань.

3. Отримані закономірності водневої деградації мартенситних і аустенітних сталей та нікелевих сплавів дозволять здійснити вибір конструкційних матеріалів і безпечних умов експлуатації деталей газових турбін й енергетичного обладнання, які працюють у водневмісних газових середовищах.

Резюме

Виявлено существование двух температурных экстремумов водородной хрупкости жаропрочных аустенитных сталей и сплавов с интерметаллидным упрочнением (низко- и высокотемпературное) в интервале 293...1073 К. Низкотемпературный минимум их свойств в водороде на 250...300 градусов выше, чем мартенситных и гомогенных аустенитных сталей. Высокотемпературный максимум водородной хрупкости проявляется при 1073 К в сталях и сплавах с интерметаллидным упрочнением и низким содержанием тугоплавких элементов (Mo, Nb, W), которые замедляют фазовые превращения в процессе испытаний. При температуре 293 К действие внешней водородной атмосферы и внутреннего заранее поглощенного водорода определяется структурным классом и содержанием никеля в материале. Степень хрупкости сплавов на основе никеля (56 и более вес.% Ni) и мартенситных жаропрочных сталей определяется давлением газообразного водорода, а дополнительное действие внутреннего предварительно абсорбированного водорода ощутимо только при небольшом давлении. Характеристики пластичности и малоциклового долговечности аустенитных сталей (23...28 вес.% Ni) ухудшаются лишь после предварительного наводороживания и мало изменяются с ростом давления водородной атмосферы, а железоникелевый сплав (43 вес.% Ni) чувствителен к воздействию внешнего и внутреннего водорода. Установлено существование предела водородной деградации – предельно минимальных значений показателей работоспособности сталей и сплавов (относительные удлинение и поперечное сужение, число циклов до разрушения), которые не снижаются с ростом давления абсорбированного и содержания поглощенного водорода, уменьшением скорости и частоты нагружения. Такие значения механических характеристик мартенситных сталей и сплавов на никелевой основе достигаются при давлениях водорода более 10 и 30 МПа, а аустенитных дисперсионно твердеющих сталей и сплавов – при его содержании 15 и 30 млн⁻¹ соответственно.

1. Dadfarnia M., Nagao A., Wang S., et al. Recent advances on hydrogen embrittlement of structural materials. *Int. J. Fracture*. 2015. **196**, Nos. 1–2. P. 223–243.
2. Barrera O., Bombac D., Chen Y., et al. Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum. *J. Mater. Sci.* 2018. **53**, No. 9. P. 6251–6290.
3. Томпсон А. У., Бернштейн И. М. Роль металлургических факторов в процессах разрушения с участием водорода. Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее. Коррозионное растрескивание. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1985. С. 47–149.

4. Symons D. M. A comparison of internal hydrogen embrittlement and hydrogen environment embrittlement of X-750. *Eng. Fract. Mech.* 2001. **68**, No. 6. P. 751–771.
5. Delafosse D., Feaugas X., Aubert I., et al. Hydrogen effects on the plasticity of fcc nickel and austenitic alloys. B. Somerday, P. Sofronis, and R. Jones (Eds.). *Effects Hydrogen on Materials (Proc. of the 2008 Int. Hydrogen Conference, Sept. 7–10, 2008, Wyoming, USA)*. ASM International, Materials Park, OH, 2009. P. 78–87.
6. Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., Syrotyuk A. M. and Barna R. A. Effect of hydrogen concentration on fatigue crack growth behaviour in pipeline steel. *Int. J. Hydrogen Energ.* 2017. **42**, No. 9. P. 6401–6408.
7. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Metallurgy, 1985. 217 с.
8. Нельсон Г. Г. Водородное охрупчивание. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов. Пер. с англ. под. ред. К. Л. Брайента, С. К. Бенерджи. М.: Metallurgy, 1988. С. 256–333.
9. Панасюк В. В., Дмитрах І. М. Міцність конструкційних металів у воднево-вмісних середовищах. До 60-річчя з часу заснування Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. Львів: Сполом, 2011. С. 101–120.
10. Balitskii A., Ivaskevich L., Mochulskiy V., et al. Influence of high pressure and high temperature hydrogen on fracture toughness of Ni-containing steels and alloys. *Arch. Mech. Eng.*, 2014, **LXI**, No. 1. P. 129–138.
11. Balitskii A., Vitvitskii V., Ivaskevich L., and Elias J. The high- and low-cycle fatigue behavior of Ni-contain steels and Ni-alloys in high pressure hydrogen. *Int. J. Fatigue*, 2012. **39**. P. 32–37.
12. Gray H. R. Testing for hydrogen environment embrittlement: Experimental variables. *Hydrogen Embrittlement Testing*. ASTM STP 543. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1974. P. 133–151.
13. Balitskii A., Ivaskevich L., and Mochulskiy V. The effects of hydrogen on mechanical properties of Ni-base alloys under the static and cyclic loading. Proc. of the 13th Int. Conf. on Fracture (ICF13), (June 16–21, 2013, Beijind, Chine). Paper No. 10557.
14. Voitsov I. E., Grishechkin S. K., Malkov I. L., et al. Physical and mechanical characteristics of EP741 and EP99 high-temperature nickel alloys in high-pressure hydrogen gas. *Int. J. Hydrogen Energ.* 1999. **24**, No. 9. P. 919–926.
15. Фишгойт А. В., Колачев Б. А. Испытания на прочность в аэрокосмической промышленности. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 1997. № 4. С. 151–154.
16. ГОСТ 9651-84 (ИСО 783-89). Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. М.: Изд-во стандартов, 1984. 41 с.
17. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1981. 25 с.
18. Паршин А. М. Структура, прочность и пластичность нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, применяемых в судостроении. Л.: Судостроение, 1972. 288 с.
19. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1968. Т. 1. 596 с.
20. Масленков С. Б., Масленкова Е. А. Стали и сплавы для высоких температур. Справочник. В 2 кн. М.: Metallurgy, 1991. 832 с.
21. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Пер. с англ. М.: Metallurgy, 1995. 384 с.
22. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. Пер. с англ. М.: Metallurgy, 2004. 576 с.

Поступила 22. 02. 2018