

УДК 620.197.5: 669.788

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛІ 40X

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, О. В. ГЕМБАРА, С. Т. ШТАЮРА,
П. С. КУНЬ, Р. Б. КОСТІВ

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

Запропоновано теоретико-експериментальний підхід для кількісної оцінки впливу водню на механічні властивості сталі 40X. Експериментально визначено характеристики міцності та пластичності і побудовано аналітичні залежності границі текучості, істинних напружень та відносного звуження сталі 40X від концентрації в ній водню.

Ключові слова: механічні характеристики, концентрація водню.

Відомо, що водень, діючи на метал, змінює його фізико-механічні характеристики [1]. У зв'язку з цим розроблено методику для визначення впливу водню на фізико-механічні властивості матеріалу за його деформування. Методика базується на силовій схемі розтягу циліндричного зразка [2] у камері високого тиску.

Матеріали та методика випробувань. Для визначення механічних характеристик сталі 40X використовували гладкі зразки круглого перерізу типу IV (згідно з ГОСТ 1497-84) з номінальним діаметром у робочій частині $d_0 = 10$ mm, завдовжки 100 mm та різьбовою захватною частиною. Зразки виготовляли із прутка сталі 40X в стані постачання, враховуючи вимоги стандарту щодо місця вирізки із заготовки, режимів різання і охолодження.

Випробовували на міцність на універсальній розривній машині FP-100/1 за статичного розтягу. Характеристики міцності ($\sigma_{0,2}$, σ_B) та пластичності (δ , ψ) сталі визначали за таких умов: температура 20°C, вологість 50...60%, атмосферний тиск 0,1 МПа, швидкість навантаження зразків $1,667 \cdot 10^{-5}$ m/s (незмінна під час випробувань усіх партій зразків). Згідно з ГОСТ 1497-84, механічні характеристики визначали під час випробувань трьох зразків.

Зразки навантажували до руйнування з одночасним записом діаграм “навантаження P –видовження Δl ” та “навантаження P –звуження Δd ” і фіксували за допомогою розробленої системи вимірювання. Після руйнування зразка вимірювали видовження l_c та діаметр шийки d_c , і результати використали для розрахунків механічних характеристик [2].

Щоб оцінити вплив газоподібного водню на опірність досліджуваної сталі водневій деградації, виконали експериментальні дослідження ненаводнених зразків у стані постачання на повітрі та наводнених у спеціальних випробувальних камерах із заданими параметрами середовища. Наводнювали зразки у камері за температури 400°C і тисків 0,1; 0,9; 10 МПа упродовж 4 h. Після цього їх випробовували у наповненій воднем камері і руйнували за вищенаведених тисків. Під час випробувань записували діаграми “зусилля розтягу–видовження” в пам'ять персонального комп'ютера з використанням аналого-цифрового перетворювача.

Визначення концентрації водню в досліджуваній сталі. Щоб встановити залежність механічних характеристик від кількості водню, розробили методику,

за якою у фрагменті розірваного наводненого зразка, випробуваного за тисків 0,1; 0,9; 10 МПа зі сторони поверхні зламу визначали концентрацію водню.

Вирізаний фрагмент зразка розміром 2×3 mm помістили у рідкий азот. Концентрацію водню у ньому з боку поверхні зламу визначали методом вакуумної екстракції [3] за діапазону вимірювання $10^{-5} \dots 10^{-2}$ mass.%, точність $\pm 3\%$. Екстракцію газу з металу виконували імпульсним нагрівом до температури 2500°C. Результати аналізу (табл. 1, чисельник) виводили на цифровий вольтметр. У знаменнику подані для порівняння теоретичні результати, обчислені згідно з законом Сівертса.

Таблиця 1. Концентрація водню у зразках зі сталі 40X

Тиск, МПа	Маса фрагмента зразка, kg	Вміст H ₂ , ppm
0,1	$1,1854 \cdot 10^{-3}$	4,5 / 3,5
0,9	$1,1792 \cdot 10^{-3}$	11 / 10,6
10	$1,3736 \cdot 10^{-3}$	32 / 35

Як бачимо (табл. 1), зі збільшенням тиску водню у камері до 10 МПа за розриву циліндричних зразків зі сталі 40X концентрація водню у фрагменті зразка з боку поверхні зламу, де напруження максимальні, підвищується.

Результати випробувань. Визначені механічні характеристики сталі 40X на повітрі та у водні показані на гістограмі (рис. 1).

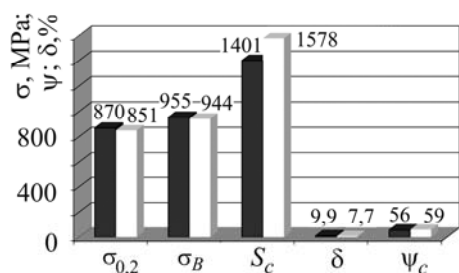


Рис. 1. Механічні характеристики сталі 40X: □ – на повітрі, ■ – у водні (10 МПа).

Fig. 1. Mechanical properties of 40X steel: □ – in air, ■ – in hydrogen (10 MPa).

За результатами аналізу діаграм руйнування сталі 40X, отриманих на повітрі і у водні, встановлено, що характеристики міцності $\sigma_{0.2}$, σ_B за дії водню збільшуються на 2...3%, а відносне звуження ψ_c та істинне напруження S_c зменшуються на 8...10%. Це вказує на те, що вплив водню на фізико-механічні характеристики матеріалу посилюється за високих напружень та деформацій, де матеріал пластично здеформований.

Встановлення залежностей механічних характеристик від концентрації водню. Для опису результатів експериментальних досліджень аналітичними залежностями використали метод найменших квадратів [4]. На основі заданої системи n експериментальних точок (x_i, y_i) необхідно побудувати аналітичну залежність $Y(x) = F(x, a_1, a_2, \dots, a_m)$, для якої виконується умова найменших квадратичних відхилень від величин y_i при x_i . Іншими словами, вимагається досягнення мінімального значення функціонала

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [y_i - Y(x_i)]^2, \quad (1)$$

де a_j – невідомі параметри, які разом із функцією F забезпечують задоволення умови

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_m) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n [y_i - Y(x_i)]^2 \right\}, \quad (2)$$

m – кількість задіяних параметрів у формулі для функції F .

Формальний запис функціонала можна подати в такому вигляді

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)]^2. \quad (3)$$

Тип функції F підбираємо на основі аналізу експериментальних результатів, а значення довільно вибраних m параметрів знаходимо із розв'язку системи алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi(a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_1} = 0, \\ \frac{\partial \Phi(a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_2} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi(a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_m} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де, згідно зі співвідношенням (3),

$$\frac{\partial \Phi(a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_j} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)] \cdot \frac{\partial F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_j}. \quad (5)$$

Таким чином, у загальній постановці необхідно розв'язати таку систему m алгебраїчних рівнянь стосовно параметрів a_j ($j = 1, 2, \dots, m$)

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)] \cdot \frac{\partial F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_1} = 0, \\ \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)] \cdot \frac{\partial F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_2} = 0, \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n [y_i - F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)] \cdot \frac{\partial F(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_m} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Аналіз експериментальних результатів щодо впливу концентрації водню C_H на механічні характеристики такі, як умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$, істинна границя міцності S_c та відносне звуження руйнування ψ_c , вказує на те, що в діапазоні досліджень залежності монотонні, без характерних інверсійних точок.

Для опису таких залежностей вибрали дробово-раціональну функцію із трьома параметрами a_j , тобто

$$F(x, a_1, a_2, \dots, a_m) = a_1 + \frac{a_2}{a_3 + x}, \quad (7)$$

де a_1, a_2, a_3 треба визначити з умов (6), в яких частинні похідні для вибраної функції (7) відносно параметрів a_j запишемо так:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(x_i, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_1} = 1, \\ \frac{\partial F(x_i, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_2} = \frac{1}{a_3 + x_i}, \\ \frac{\partial F(x_i, a_1, a_2, a_3)}{\partial a_3} = -\frac{1}{(a_3 + x_i)^2}. \end{cases} \quad (8)$$

Підставивши конкретні вирази (7) та (8) у систему рівнянь (6), приходимо до нелінійної системи трьох алгебраїчних рівнянь для визначення параметрів a_j ($j = 1, 2, 3$)

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left[y_i - a_1 + \frac{a_2}{a_3 + x_i} \right] = 0, \\ \sum_{i=1}^n \left[y_i - a_1 + \frac{a_2}{a_3 + x_i} \right] \cdot \frac{1}{a_3 + x_i} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \left[y_i - a_1 + \frac{a_2}{a_3 + x_i} \right] \cdot \frac{1}{(a_3 + x_i)^2} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Приклад застосування методу. Для реалізації запропонованого методу використано експериментальні результати (табл. 2) досліджень впливу концентрації водню на механічні характеристики сталі 40X.

Таблиця 2. Вплив концентрації водню на механічні характеристики сталі 40X

Механічні характеристики	C_H , ppm			
	0	4,5	11	32
$\sigma_{0,2}$, МПа	851	855	860	870
S_c , МПа	1578	1480	1420	1401
ψ_c	0,59	0,575	0,57	0,56

Для зручності подання аналітичної обробки цих експериментальних результатів перейдемо до відносних величин (табл. 3), приймаючи, що концентрація H_2 дорівнює нулю у ненаводнених зразках сталі 40X.

Таблиця 3. Відносні механічні характеристики сталі 40X за різної концентрації водню

Відносні механічні характеристики	C_H , ppm			
	0	4,5	11	32
$\sigma_{0,2}(C_H) / \sigma_{0,2}$	1	1,006	1,012	1,024
$S_c(C_H) / S_c$	1	0,925	0,887	0,875
$\psi_c(C_H) / \psi_c$	1	0,988	0,979	0,966

На підставі цього із запропонованої в рівнянні (7) функції отримали такі залежності трьох відносних механічних характеристик від концентрації водню.

$$\begin{cases} \sigma_{0,2}(C_H) / \sigma_{0,2} \\ S_c(C_H) / S_c \\ \psi_c(C_H) / \psi_c \end{cases} = a_{1i} + \frac{a_{2i}}{a_{3i} + C_H}. \quad (10)$$

Тут $i = A_i$; $A = \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{Bmatrix}$; а невідомі параметри подані у табл. 4.

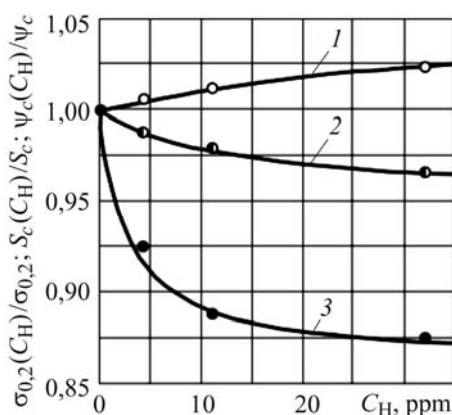
Таблиця 4. Результати обчислень параметрів інтерполяційних формул

Характеристики матеріалу	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	$\Phi_i(a_1, a_2, a_3)$
$\sigma_{0,2}$	1,0427	-1,0898	24,6784	0,0000005
S_c	0,8614	0,3858	1,7789	0,000026
ψ_c	0,9527	0,5616	10,9810	0,0000025

На рис. 2. показані результати трипараметричної інтерполяції експериментальних даних.

Рис. 2. Залежність відносних механічних характеристик від концентрації водню: суцільна крива – трипараметрична залежність; точки – експериментальні результати; 1 – $\sigma_{0,2}(C_H)/\sigma_{0,2}$; 2 – $\psi_c(C_H)/\psi_c$; 3 – $S_c(C_H)/S_c$.

Fig. 2. Dependence of the relative mechanical characteristics on hydrogen concentration: solid curve – three-parameter dependence; points – experimental data; 1 – $\sigma_{0,2}(C_H)/\sigma_{0,2}$; 2 – $\psi_c(C_H)/\psi_c$; 3 – $S_c(C_H)/S_c$.



ВИСНОВКИ

Встановлено характеристики міцності і пластичності сталі 40X у стані поставання на повітрі та у водні за фіксованих тисків 0,1; 0,9; 10 МПа. Для оцінювання зміни механічних властивостей від рівня наводнювання сталі здійснили апроксимацію експериментальних результатів. Запропонований підхід можна використовувати під час дослідження опірності руйнуванню у водневому середовищі різних класів низьколегованих конструкційних сталей у довільному діапазоні зміни тиску.

РЕЗЮМЕ. Предложен теоретико-экспериментальный подход для количественной оценки влияния водорода на механические свойства стали 40X. Экспериментально установлены характеристики прочности и пластичности, а также построены аналитические зависимости предела текучести, истинных напряжений и относительного сужения стали 40X от концентрации в ней водорода.

SUMMARY. The theoretical and experimental approach to evaluation of the influence of hydrogen on the mechanical properties of steels was proposed. Characteristics of strength and plasticity were experimentally established. Analytical dependences of yield stress, true fracture stresses and relative narrowing of 40X steel on the concentration of hydrogen in the metal were built.

1. Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
2. ГОСТ 1497-84 (СТ СЭВ 471-77). Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд. стандартов, 1985. – 40 с.
3. Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
4. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.

Одержано 03.12.2013