

ВПЛИВ ЧАСУ НАВОДНЮВАННЯ ЗА ПІДВИЩЕНИХ ПАРАМЕТРІВ НА МІЦНІСТЬ СТАЛІ 60C2A

М. М. ГВОЗДЮК^{1,2}, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, Т. В. ГЕМБАРА³, С. Т. ШТАЮРА¹, М. В. ГРИНЕНКО¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

²Національний університет "Львівська політехніка"

³Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Проведено випробування на розтяг легованої пружинної сталі 60C2A за умов дії газоподібного водню підвищених параметрів: температури 400°C та тиску 6 МПа. Побудовано істинні діаграми руйнування сталі 60C2A за різного часу наводнювання. Для встановлення величини локальної деформації, використані метод оптико-цифрової кореляції зображень на поверхні зразка та спеціальне програмне забезпечення. Встановлено, що збільшення часу наводнювання знижує за лінійним законом руйнуючі напруження та деформації.

Ключові слова: сталь 60C2A, водневе середовище, істинні напруження, істинні деформації, індекс водневого окрихчення, цифрова кореляція зображень.

Tensile tests of alloyed spring steel 60C2A were carried out under the action of gaseous hydrogen of increased parameters: temperature 400°C and pressure 6 MPa. True fracture diagrams of steel 60C2A were constructed for different hydrogenation times. To determine the magnitude of local deformation, the method of optical-digital correlation of images on the surface of the sample and special software were used. It was established that with increasing hydrogenation time, the destructive stresses and deformations decrease according to a linear law. **Keywords:** steel 60C2A, hydrogen environment, true stresses, true strains, hydrogen embrittlement index, digital image correlation.

Вступ. Однією з актуальних проблем у матеріалознавстві є вплив водню на міцнісні характеристики конструкційних матеріалів. Це особливо критично для конструктивних компонентів, що експлуатуються в середовищах з підвищеним вмістом водню, таких як паливні системи, теплова енергетика, хімічна промисловість та особливо воднева енергетика [1-4]. Сталь 60C2A є легованою пружинною сталлю, яка характеризується високими механічними властивостями (табл.1). Проте дія високотемпературного та високотискового водню (наприклад, при 400°C і 6 МПа) призводять до зародження мікротріщин, зменшення границі текучості та зниження граничної деформації [3]. Навіть незначна кількість водню, накопиченого у сталевій матриці, може суттєво зменшити час до руйнування та допустиме навантаження [5, 6]. Тому важливо встановити інваріантні характеристики матеріалу та їх зміну, із врахуванням часового впливу водневого середовища за експлуатаційних параметрів.

Таблиця 1. Типова експлуатація сталі 60C2A (аналог 9260) у середовищі водню [7-9].

№	Галузь застосування	Пристрій (компонент)	Умови середовища	Потенційні ризики	Заходи до захисту сталі
1	Водневі компресори	Пружини високого навантаження	Водень під тиском до 20 Мпа, T < 100 °C	Водневе окрихчення	Гартування і відпуск; покриття (Ni, Zn)
2	Автомобілі на водні (H2 fuel cell)	Пружинні елементи підвіски, амортизатори	Періодичний контакт з воднем	Повільна воднева деградація	Термообробка, контроль мікроструктури
3	Арматура водневих систем	Пружини клапанів, ущільнення	Водневе середовище до 350 °C	Високий тиск та температура	Легування Cr, Si; карбідостійка структура
4	Залізнична техніка з водневим приводом	Пружини ресор водневих локомотивів	Вплив атмосферного водню	Кумулятивне окрихчення при вібраціях	Поверхнева обробка, захисні шари

Метою даної роботи є дослідження впливу тривалості дії водневого середовища на зміну істинних руйнуючих напружень і деформацій сталі 60С2А із застосуванням високоточного сучасного безконтактного оптико-цифрового методу кореляції зображень для постійного контролю переміщень у локальній зоні з відповідною одночасною математичною програмною обробкою і побудови відповідних діаграм руйнування.

Матеріал, обладнання та методика досліджень. У даній роботі досліджували вплив часу наводнювання на міцнісні характеристики сталі 60С2А. Вона містить карбон (0.57– 0.63%), що забезпечує високу міцність, а також силіцій (1.6–2.0%), який підвищує еластичність та міцність при розтягуванні. Марганець (0.6-0.9%) у складі сталі покращує її зварюваність та зносостійкість (табл.2). Ця сталь широко використовується для виготовлення різних пружинних елементів у машинобудуванні, які вимагають високої міцності та стійкості до деформацій (табл.1).

Таблиця 2. Хімічний склад сталі 60С2А в %, згідно з ГОСТ 14959-79

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.58 - 0.63	1.6 - 2	0.6 - 0.9	до 0.25	до 0.025	до 0.025	до 0.3	до 0.2

Із досліджуваної сталі виготовили 20 циліндричних зразків (рис. 1), по 5 зразків для різних параметрів. Застосовано методику побудови істинних діаграм деформування з врахуванням водневого середовища із використанням безконтактної оптико-цифрової системи (ОЦС), за допомогою алгоритму цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Методом оптико-цифрової кореляції зображень [10,11] вимірювали істинні деформації в експериментальному зразку де напружено-деформований стан є однорідний. За цією методикою визначали локальну деформацію, її розподіл по усій поверхні зразка, а також місце початку руйнування.

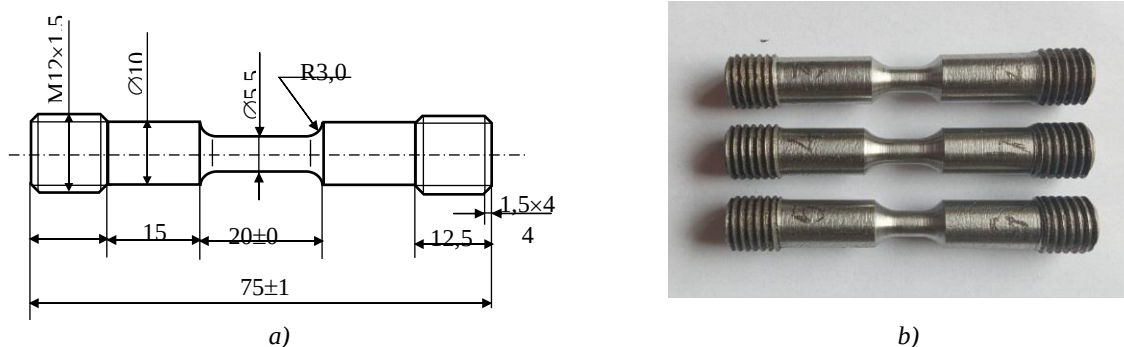


Рис. 1. Конструктивна схема (а) та фото експериментальних зразків (b).

Fig. 1. Structural diagram (a) and photos of experimental samples (b).

Підготовлені для експерименту зразки наводнювали із газоподібної фази у герметичній камері із нержавіючої сталі: температура наводнювання становила 400°C, за тиску 6 МПа, час витримки 24; 48 і 96 годин. Після цього на спеціально підготовлену робочу поверхню зразків, чорною фарбою наносили основу. Далі на цю основу білою фарбою напилювали стохастичний крапковий малюнок (рис. 2). Зразок фіксували у захоплювачах електро-механічної розривної машині FP-100 (рис. 3) і піддавали розтягу з одночасною реєстрацією величини сили навантаження індуктивним штатним динамометром машини до руйнування (рис.4). Швидкість переміщення рухомої траверси машини становила 1,0 mm/min. Паралельно із навантаженням, за допомогою цифрової фотокамери дистанційно реєстрували видовження центральної робочої зони зразка. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням програмного забезпечення Power Graph 3.3.8 [11].

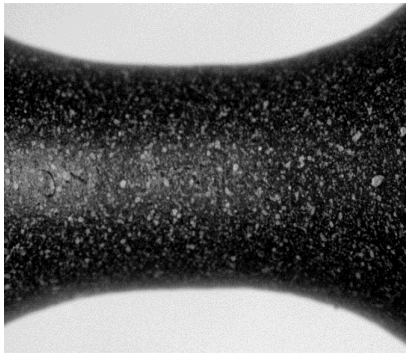


Рис. 2. Фото поверхні зразка підготовленого до експерименту.
Fig. 2. Photo of the surface of the sample prepared.



Рис. 3. Зразок у захоплювачах розривної машини.
Fig. 3. Sample in the grippers of the breaking machine.

Визначення міцнісних характеристик досліджуваного матеріалу проводили на основі побудованих істинних діаграм руйнування “ $P - \Delta l$ ” (P – величина зусилля, Δl – видовження матеріалу зразка в зоні максимальних деформацій на базі 1,0 mm). Величину істинних напружень S_i в зоні максимальних деформацій визначали за співвідношенням $S_i = P_i/F_i$, де F_i – реальне значення площі поперечного перерізу з врахуванням зміни його діаметра. Величину істинної деформації e в локальному об’ємі розраховували на основі даних переміщень у двох напрямках на базі 1,0 mm з використанням оптико-цифрового корелятора спекл-зображень.

Результати досліджень та їх аналіз. Із побудованих істинних діаграм руйнування зразків в координатах « $S-e$ » за різного часу їх наводнення (рис. 5), отримали залежність впливу часу наводнювання на характеристику пластичності матеріалу – відносне звуження матеріалу Ψ (рис. 6).



Рис. 4. Зруйновані експериментальні зразки.
Fig. 4. Destroyed experimental samples.

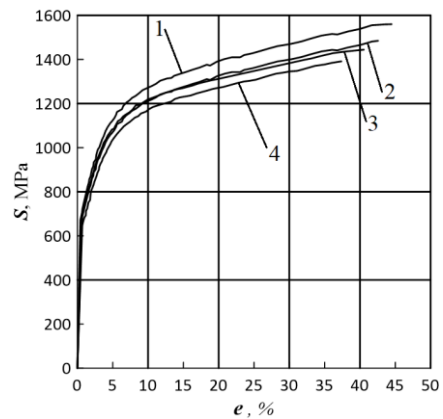


Рис. 5. Істинні діаграми руйнування зразків за різного часу наводнювання: 1– вихідний стан; 2– 24 години; 3– 48 годин; 4– 96 годин.

Fig. 5. True diagrams of the fracture of samples at different hydrogenation times: 1– initial state; 2– 24 hours; 3– 48 hours; 4– 96 hours.

Встановлено, що у пружній області деформування практично не спостерігається впливу водню, а зі збільшенням часу наводнювання, а отже і концентрації водню, спостерігається зменшення руйнуючих напружень (рис. 7) і деформації руйнування (рис. 8а), практично за лінійним законом.

За максимального наводнення істинні напруження руйнування понижуються на 12% , а деформація руйнування на 18% порівняно із матеріалом у вихідному стані.

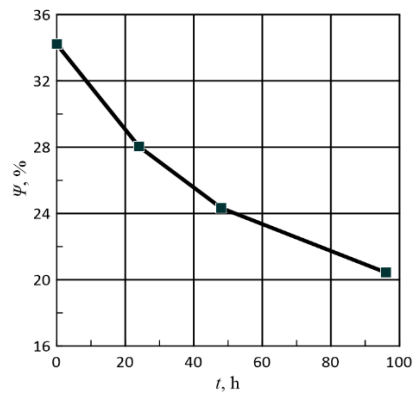


Рис. 6. Вплив часу наводнювання зразка на величину його відносного звуження.

Fig. 6. Dependence of the hydrogenation time of the sample on the value of its relative conditional narrowing.

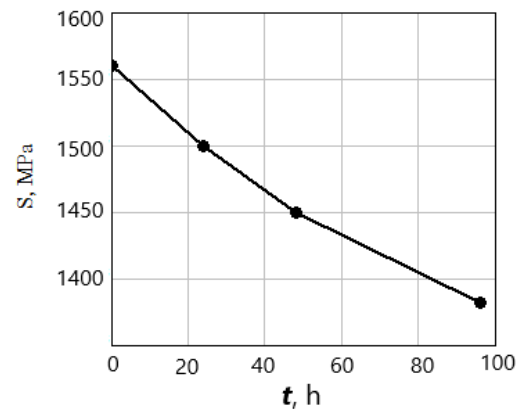


Рис. 7. Вплив часу наводнювання зразка на величину руйнуючих напружень.

Fig. 7. Dependence of the hydrogenation time of the sample on the value of its relative conditional narrowing.

Для оцінювання сприйнятливості сталі 60C2A до водневого окрихнення застосували індекс водневого окрихнення (Index HE), який визначали з співвідношення:

$$\text{Index HE} = (e_0 - e_{CH})/e_0$$

Він зростає зі збільшенням часу наводнювання (рис.8б), що вказує на чутливість сталі 60C2A до водневої деградації яка зростає зі збільшенням часу зарядки газоподібним воднем, досягаючи 15,7% за 96 год. наводнювання. Ці результати демонструють, що сталь 60C2A може бути чутливою до водневого окрихнення. Метал за таких умов наводнювання руйнується крихко без видимих ознак значного пластичного деформування (рис.4).

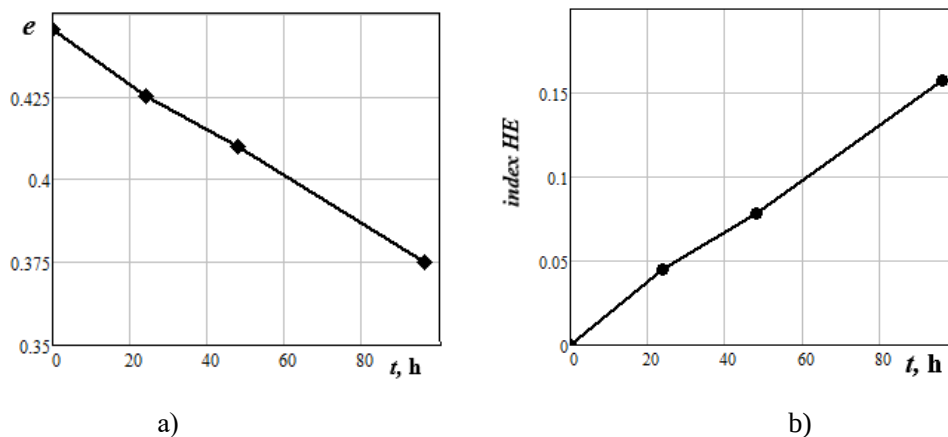


Рис.8. Вплив часу наводнювання на деформацію руйнування зразків (а) та індекс водневого окрихнення (б).

Fig. 8. Effect of hydrogenation time on the fracture strain of samples (a) and hydrogen embrittlement index (b).

ВИСНОВКИ

Встановлено негативний вплив абсорбованого водню на міцність і пластичність даної сталі, який посилюється зі збільшенням тривалості наводнювання за постійного тиску і температури, практично за лінійним законом. Після 96 годин максимальної витримки зразків у газоподібному водневому середовищі за температури 400°C, і тиску 6 МПа, напруження руйнування зменшуються, в середньому, на 12%, а відповідна відносна деформація розтягу – на 18%, і такий результат можна поширити на аналоги цієї сталі 9260 (США), SUP6 (Японія), 60MnSiCr4 (Німеччина) тощо. Вочевидь, це потрібно брати до уваги, щоб гарантувати ресурс експлуатації конструктивних елементів даного типу сталі та її аналогів, а також прийняття рішень щодо захисту сталі, - використання покриттів, оптимізації термообробки, легування елементами, що зменшують водневу проникність (наприклад Cr, Mo, Ni).

1. Ivanyts'kyi, Y., Kharchenko, Y., Hembara, O., Chepil, O., Sapuzhak, Y., & Hembara, N. (2019). The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation. *Procedia Structural Integrity*, **16**, 126-133. doi:10.1016/j.prostr.2019.07.031
2. Jiang, Q., Hembara, O.V. & Chepil', O.Y. Modeling of the Influence of Hydrogen on the Accumulation of Defects in Steels Under High-Temperature Creep. *Mater Sci* **55**, 251–259 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00296-x>
3. Dutkiewicz M, Hembara O, Ivanyts'kyi Y, Hvozdiuk M, Chepil O, Hrynenko M, Hembara N. Influence of Hydrogen on the Fracture Resistance of Pre-Strained Steam Generator Steel 22K. *Materials*. 2022; 15(19):6596. <https://doi.org/10.3390/ma15196596>
4. Dutkiewicz M, Hembara O, Chepil O, Hrynenko M, Hembara T. A New Energy Approach to Predicting Fracture Resistance in Metals. *Materials*. 2023; 16(4):1566. <https://doi.org/10.3390/ma16041566>
5. Dmytrakh I.M., Syrotyuk A.M., Krasiuk O.P. et al. Specific features of hydrogen-charged 60S2A steel fragmentation under static explosion tests. *Mater Sci* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00917-8>
6. Dmytrakh I.M., Syrotyuk A.M. & Tsyrlunyk O.T. Influence of electrochemical hydrogen charging on loss of plasticity and development of volumetric microdamaging of 60S2A steel. *Mater Sci* **60**, 148–155 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11003-025-00865-3>
7. Lynch S. P. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms // *Corrosion Reviews*. – 2012. – Vol. 30, No. 3–4. – P. 105–123.
8. Liu, F., Liu, Y., Li, X., Zhao, S., & Fang, H. Hydrogen Embrittlement Behavior of a High-Strength Spring Steel Treated by Q&P Process // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2024. – Vol. 33. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09242-8>
9. Hagi, H., Sakamoto, T., Tanimura, M., et al. Effect of Hydrogen on Tensile Properties of Austenitic Steels at Elevated Temperatures // *ISIJ International*. – 2019. – Vol. 59, № 2. – P. 247–255. – DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-539>
10. Ivanyts'kyi, Y., Hembara, O., Dudda, W. et al. Combined FEM and DIC Techniques for the 2D Analysis of the Stress-Strain Fields and Hydrogen Diffusion Near a Blunt Crack Tip. *Strength Mater* **54**, 256–266 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00399-y>
11. Ya. L. Ivanyts'kyi, Yu. V. Mol'kov, P. S. Kun', T. M. Lenkovs'kyi, M. Wójtowicz. Determination of the Local Strains Near Stress Concentrators by the Digital Image Correlation Technique // *Materials Science*. 2015, Volume 50, Issue 4, P. 488–495.