

Main reason of the phenomenon of different deformation of metal from typical areas of T-joint under static and cyclic loading is variant morphology of the metal microstructure in its specific areas that was formed during manufacturing process.

The actual failure number of cycles of the full-scale specimen with defect satisfactorily corresponds the predicted results based on experimental and calculated data of stress-strain investigations.

During assessment of the damaged T-joint mechanical properties of the metal in its characteristic area, structural stress concentration and the concentration of stress caused by the defect presence must be taken into account.

#### **Список використаної літератури**

1. СНиП 2.05.06-85 (2000) Магистральные трубопроводы.
2. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении. Обзорная информация. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов [Текст] / М.И. Волский, А.С. Аистов, А.П. Гусенков, Л.К. Гуменный. – М.: – ВНИИОЭНГ, 1979.
3. ГОСТ 17376-2001 Тройники бесшовные приварные.
4. Гопкало, О. Визначення опору малоцикловому навантаженню конструкційної сталі [Текст] / О. Гопкало // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2014 – № 3 – (75). – С. 66 – 77.
5. Fischmeister H.F., Danzer R., Buchmayr B., Life time prediction models. Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. 8 (1986), 495 – 549.
6. МР 189-86. Расчеты и испытания на прочность. Метод оценки сопротивления металлических материалов усталостному разрушению по шагу усталостных бороздок [Текст] – М.: ВНИИММАШ, 1986. – 36 с.
7. Гарф, Э.Ф Концентрация напряжений на участках коррозионных повреждений трубопроводов [Текст] / Э.Ф. Гарф, С.В. Кобельский, П.С. Юхимец // Автоматическая сварка. – 2000 – № 6.
8. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст] – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
9. Когаев, В.П Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст] / В.П Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
10. Серенсен, С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. [Текст] / С.В. Серенсен. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 192.

*Отримано 21.08.2015*

*УДК 620.193:691.328*

**Мирослава Греділь, канд. техн. наук**

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

## **ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ АРМАТУРИ ЗА НАВОДНЮВАННЯ У МОДЕЛЬНОМУ РОБОЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

*Резюме.* Досліджено особливості руйнування перлітної сталі різних етапів процесу холодного волочіння включно з вихідним станом та кінцевим комерційним продуктом (попередньо напруженим дротом) на повітрі та за наводнювання у модельному робочому середовищі рН 12,5. Пластичність сталі підвищується зі ступенем холодного волочіння, що пояснюють поступовим переорієнтуванням перлітних колоній у напрямі волочіння, а на останніх етапах знижується. За наводнювання отримано стабільно низькі значення відносного звуження, що свідчить про високу чутливість досліджуваної сталі до водневого окрихчення, яке також проявилось у множинному мікророзтріскуванні біля поверхонь руйнування. Втрата пластичності сталі внаслідок впливу водню менша у випадку комерційного високоміцного дроту порівняно з

вихідним гарячекатаним прутком. Високу чутливість досліджуваних конструкційних сталей до водневого окрихчення слід враховувати при застосуванні електрохімічного захисту залізобетонних виробів.

**Ключові слова:** перлітна сталь, холодне волочіння, водневе окрихчення, характеристики пластичності, злами, розтріскування.

**Myroslava Hredil**

## FRACTURE PECULARITIES OF PRESTRESSED STEEL REINFORCEMENT UNDER HYDROGENATION IN THE MODEL WORKING MEDIUM

**Summary.** Peculiarities of fracture behaviour of progressively drawn pearlitic steels from the initial hot rolled bar (not cold drawn at all) to the final commercial product (prestressing steel wire) were investigated in air and under hydrogen charging in the  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$  solution with pH 12.5 which modelled a working medium of a steel reinforcement.

The slightly drawn steels showed isotropic fracture behaviour and a smooth fracture surface at the macroscopic scale. As the cold drawing degree increases, steels fractography became more irregular with numerous elevations and valleys. The percentage of reduction in area  $\psi$  calculated after slow strain rate tests in air increases with the cold drawing degree. However, heavily drawn steels exhibit  $\psi$  decrease with cold drawing. This behaviour can be explained in function of the accumulated plastic strain  $\epsilon^p$  and the colonies orientation inside the steels. In the hot rolled bar (not cold drawn at all) the orientation of pearlitic colonies (ferritic and cementite lamellas too) is random. As the cold drawn degree advances the pearlitic colonies are oriented progressively in the cold drawing direction (and  $\psi$  increase progressively too) until the steel reaches a certain value in its accumulated plastic strain. When further lamellas reorientation is not possible (almost all colonies have already been oriented), reduction in area begins to decrease, even with the increment of plastic strain. All the steels tested in air presented a symmetrical fracture surface in a macroscale (cup and cone fracture).

On the contrary to the test in air, stable low values of reduction in area were obtained under hydrogenation conditions, revealing high sensitivity of the tested steel to hydrogen embrittlement which also manifested in plural microcracking near the fracture surfaces. However plasticity loss for the tested steel due to hydrogen was less in the case of the commercial high strength wire comparing to the as-received hot rolled bar. Surface cracks appeared because of facilitation of share processes in the surface layers by hydrogenating environment. Fracture in these cases always is initiated near the lateral surface which proves a crucial role of surface defects in the case of steel wires hydrogenation. High susceptibility of the tested structural steel to hydrogen embrittlement should be taken into account using electrochemical protection of reinforced concrete structures.

**Key words:** pearlitic steel, cold drawing, hydrogen embrittlement, plasticity parameters, fracture surface, cracking.

**Постановка проблеми.** Попередньо напружені прутки з перлітної сталі широко застосовують для армування залізобетонних конструкцій різного призначення, наприклад, каркасів мостів. Перевагами такого матеріалу є його висока міцність при значній пластичності. Таку комбінацію властивостей перлітних сталей досягають шляхом холодного волочіння (ХВ). Унаслідок ХВ покращуються механічні характеристики сталі – твердість, границя плинності й границя міцності зростають.

Арматура в бетоні знаходиться в пасивному стані, що зумовлено сильно лужною реакцією порової рідини на межі арматура – бетон. Однак упродовж експлуатації рН середовища знижується через карбонізацію бетону та проникнення іонів хлору. Відомо, що високоміцні сталі чутливі до впливу середовища, а особливо до водневого окрихчення, що може виникати внаслідок наводнювання сталі під дією катодного захисту залізобетонних конструкцій. Зокрема, основною причиною їх пошкодження вважають корозійне розтріскування за одночасного впливу агресивного середовища та статичних розтягувальних напружень [1]. За таких умов, зважаючи на тривалий термін експлуатації залізобетонних об'єктів, ймовірна також експлуатаційна деградація сталевих армувальних прутків, яка характерна для інших конструкційних сталей [2 – 6].

**Мета роботи** – проаналізувати відмінності в механічній поведінці та закономірності руйнування попередньо напружених прутків перлітної сталі на повітрі й у модельному робочому середовищі.

**Матеріали та методи досліджень.** Використали циліндричні зразки зі сталі після різних етапів технологічного процесу ХВ, а також зразки вихідного гарячекатаного прутка й готового комерційного продукту. Вивчали евтектоїдну перлітну сталь, яка пройшла сім етапів ХВ. Унаслідок обробки перлітні колонії поступово переорієнтовуються у напрямку осі дроту (напрямку волочіння). Їх орієнтація стосовно осі стержня залежить від ступеня волочіння [7]. Водночас відбувається потоншення самих колоній, а також зменшується відстань між пластинками, і вони орієнтуються в напрямку волочіння [8]. Хімічний склад досліджуваної сталі такий, мас. %: 0,88 С, 0,69 Мп, 0,22 Si, 0,010 Р, 0,024 S, 0,239 Cr, 0,076 Ni, 0,010 Мо, 0,129 Cu, 0,118 V, решта Fe. Пластична деформація, накопичена на кожному етапі процесу ХВ та обчислена за формулою  $\varepsilon^{пл} = 2\ln(D_0/D_i)$ , де  $D_0$  та  $D$  – початковий та кінцевий діаметр прутка відповідно, а також діаметр прутків наведені в табл. 1, де номерами позначено етапи ХВ.

**Таблиця 1.**

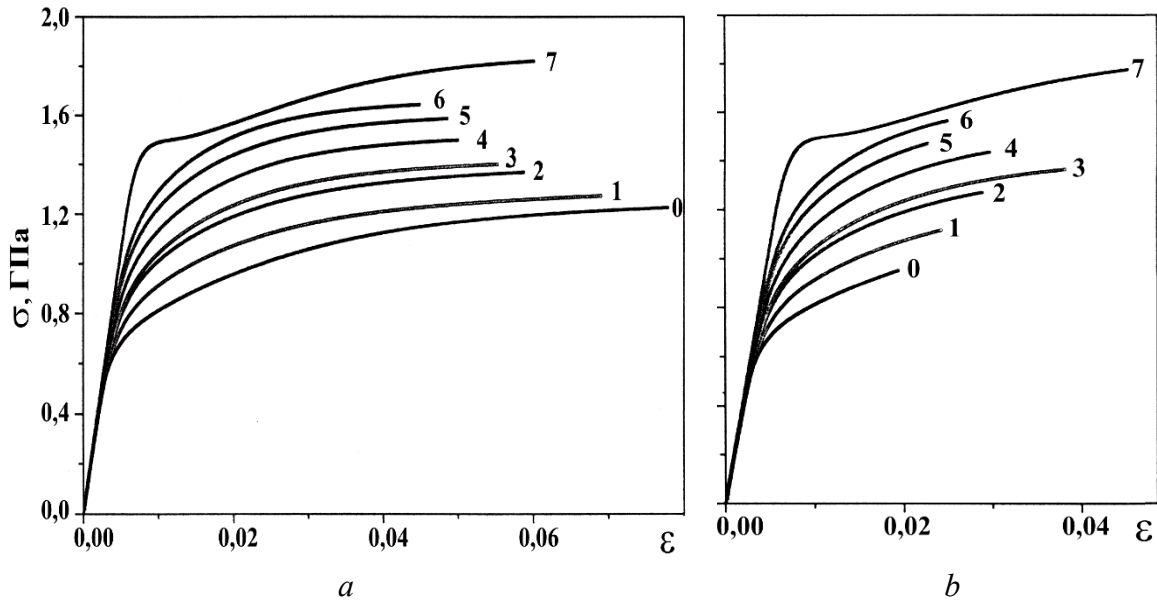
Діаметр сталевих прутків та накопичена пластична деформація

Сталь/етап ХВ	0	1	2	3	4	5	6	7
$D$ , мм	11,03	9,90	8,95	8,21	7,49	6,80	6,26	5,04
$\varepsilon^{пл}$	0,00	0,22	0,42	0,59	0,78	0,97	1,13	1,57

Чутливість досліджуваного матеріалу до водневого окрихнення визначали методом повільного розтягу зі швидкістю  $10^{-7} \text{ c}^{-1}$  циліндричних зразків довжиною 30 см та діаметром, що дорівнює діаметру відповідного прутка. Початкова відстань між затискачами 22 см. Зразки не полірували, а лише знежирювали ацетоном і промивали дистильованою водою для наближення умов експерименту до експлуатаційних. Електрохімічну комірку кріпили навколо зразка. Корозивне середовище – насичений розчин  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з додаванням 0,1 г/л NaCl (рН 12,5), що моделював порову рідину в бетоні. Робочим електродом слугував досліджуваний пруток, електродом порівняння – насичений каломельний ( $\text{Hg}|\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ). Як допоміжний електрод використано платинову спіраль, що забезпечувало рівномірний розподіл струму по довжині зразка. Сталий катодний потенціал – 1,2 В, обраний на основі попередніх досліджень [9, 10], підтримували потенціостатом. Досліджували принаймні три зразки кожного виду, результати усереднювали.

**Результати, їх обговорення.** Побудовані криві розтягу сталі всіх етапів ХВ (рис. 1) відображають поведінку сталі на стадії рівномірного видовження (до утворення шийки) на повітрі та до моменту руйнування за наводнювання. Внаслідок обробки прутків їх пластичність на повітрі за показником  $\varepsilon$  однозначно знижується. Винятком є комерційний дріт, який після ХВ за технологією проходить певну термообробку для зняття залишкових напружень.

Із отриманих результатів можна стверджувати, що водень, утворений під час катодної поляризації сталі у лужному середовищі, суттєво впливає на механічну поведінку матеріалу, першочергово на пластичність. При цьому границя текучості залишається практично незмінною, а границя міцності знижується незначно. Слід зазначити, що вибраний рівень катодної поляризації є близьким до мінімального значення, за якого проявляється вплив водню на досліджуваний матеріал [9].

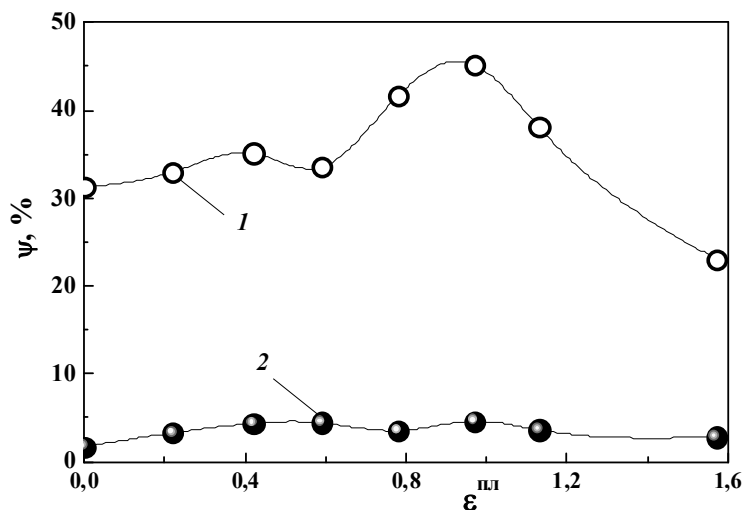


**Рисунок 1.** Криві розтягу евтектоїдної перлітної сталі на повітрі [11] (а) та за наводнювання в лужному середовищі з рН 12,5 (b). Номери на рисунку відповідають етапам ХВ

**Figure 1.** Stress-strain curves of the eutectoid pearlitic steel in air [11] (a) and in the alkali environment with pH 12.5 under hydrogenation (b)

Відносне звуження на повітрі загалом зростає зі ступенем ХВ (рис. 2, крива 1), і лише на останніх етапах дещо знижується. Таку поведінку сталі пояснюють сумісним впливом накопичених пластичних деформацій та переорієнтуванням перлітних колоній [11].

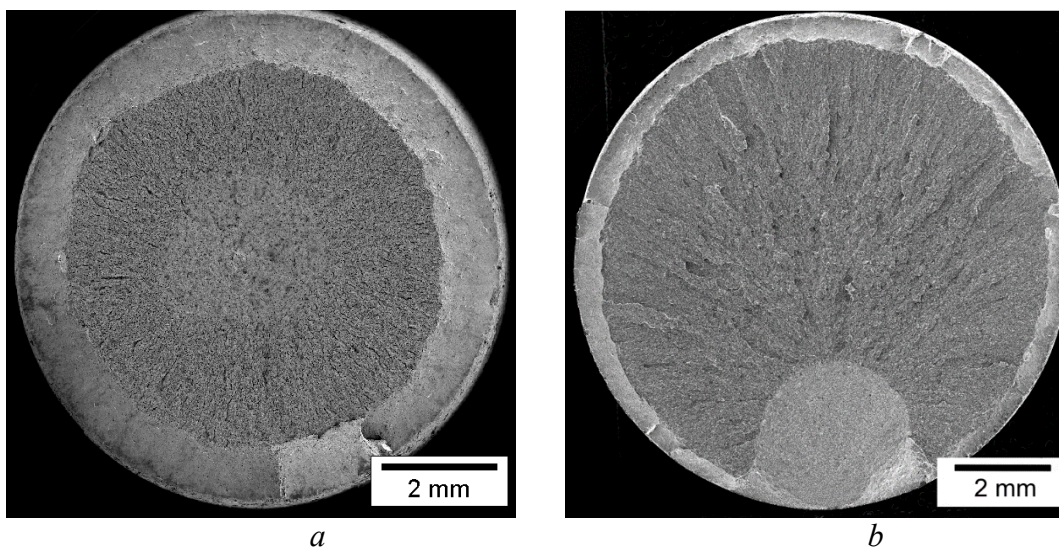
Під час холодного волочіння відбувається два принципових процеси – накопичення пластичної деформації (наклеп) та переорієнтування мікроструктурних складових. Із кожним технологічним етапом перлітні колонії поступово орієнтуються у напрямі, паралельному до поздовжньої осі прутка доти, поки практично усі вони не будуть розміщені в напрямі волочіння [7]. При цьому зростає і відносне звуження  $\psi$ . Після етапу 5, очевидно, досягнуто максимальної переорієнтації перлітних колоній, тому подальша обробка сталі призводить до деякого зниження пластичності навіть при зростанні величини накопиченої пластичної деформації. На противагу випробам на повітрі, в середовищі спостерігали стабільно низьке значення  $\psi^H$  (рис. 2, крива 2), що підтверджує значну чутливість матеріалу до водневого окрихчення, виявлену в [10].

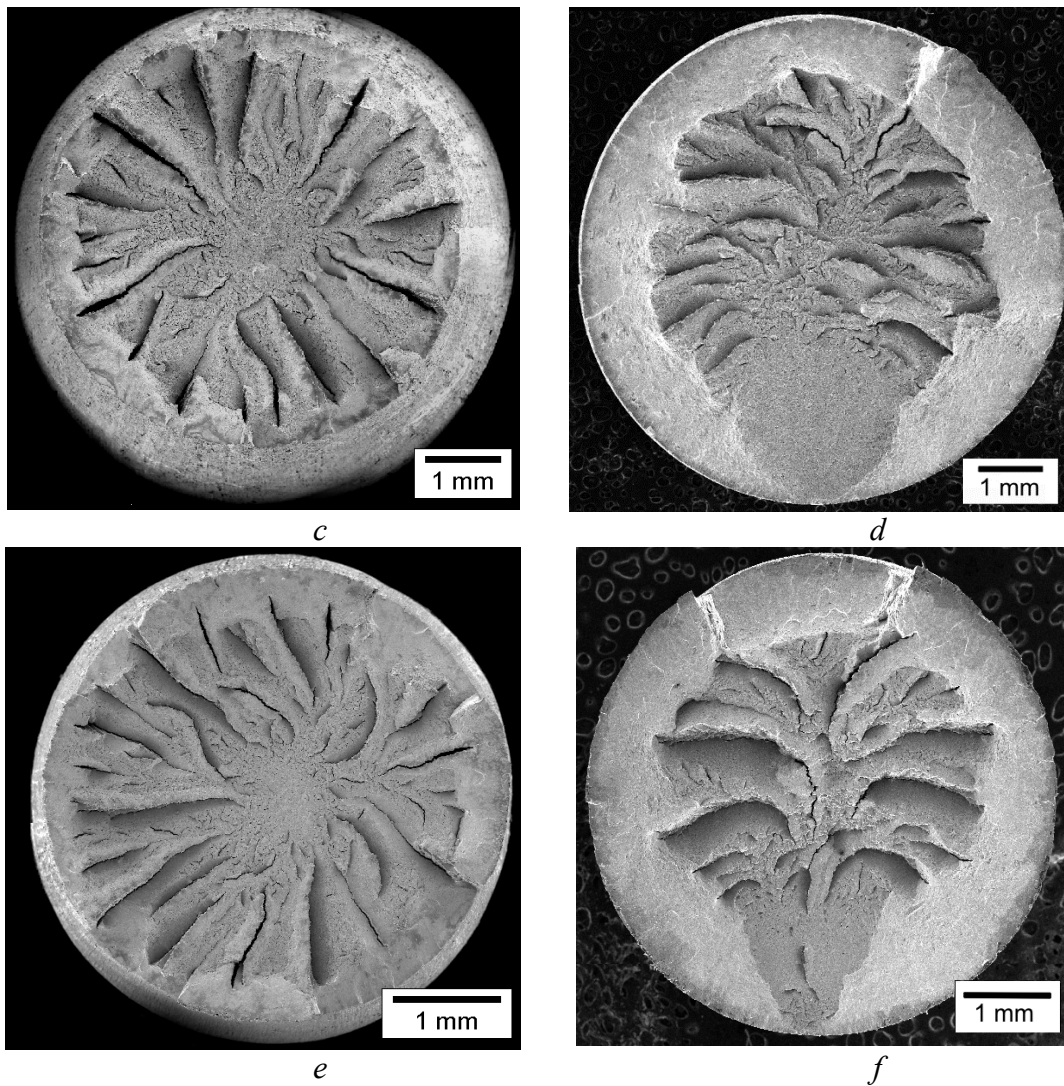


**Рисунок 2.** Втрата пластичності досліджуваної сталі внаслідок наводнювання в середовищі  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з рН 12,5 (крива 2) порівняно з випробами на повітрі (крива 1)

**Figure 2.** Plasticity loss of the tested steel due to hydrogen charging in  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solution with pH 12.5 (curve 2) comparing to the test in air (curve 1)

Із аналізу зламів (рис. 3) випливає, що тріщини на повітрі зароджувалися в центрі перерізу зразків і росли до бокової поверхні, формуючи злам типу чашка–конус. У середовищі тріщина зароджувалася від бокової поверхні зразків, зокрема від поверхневих чи підповерхневих дефектів.





**Рисунок 3.** Макрозлами зразків перлітної сталі E0 (*a, b*), E4 (*c, d*) та E7 (*e, f*) після випроб на повітрі (*a, c, e*) та за наводнювання (*b, d, f*)

**Figure 3.** Fracture maps of the tested steel E0 (*a, b*), E4 (*c, d*) та E7 (*e, f*) after tensile tests in air (*a, c, e*) and under hydrogen charging (*b, d, f*)

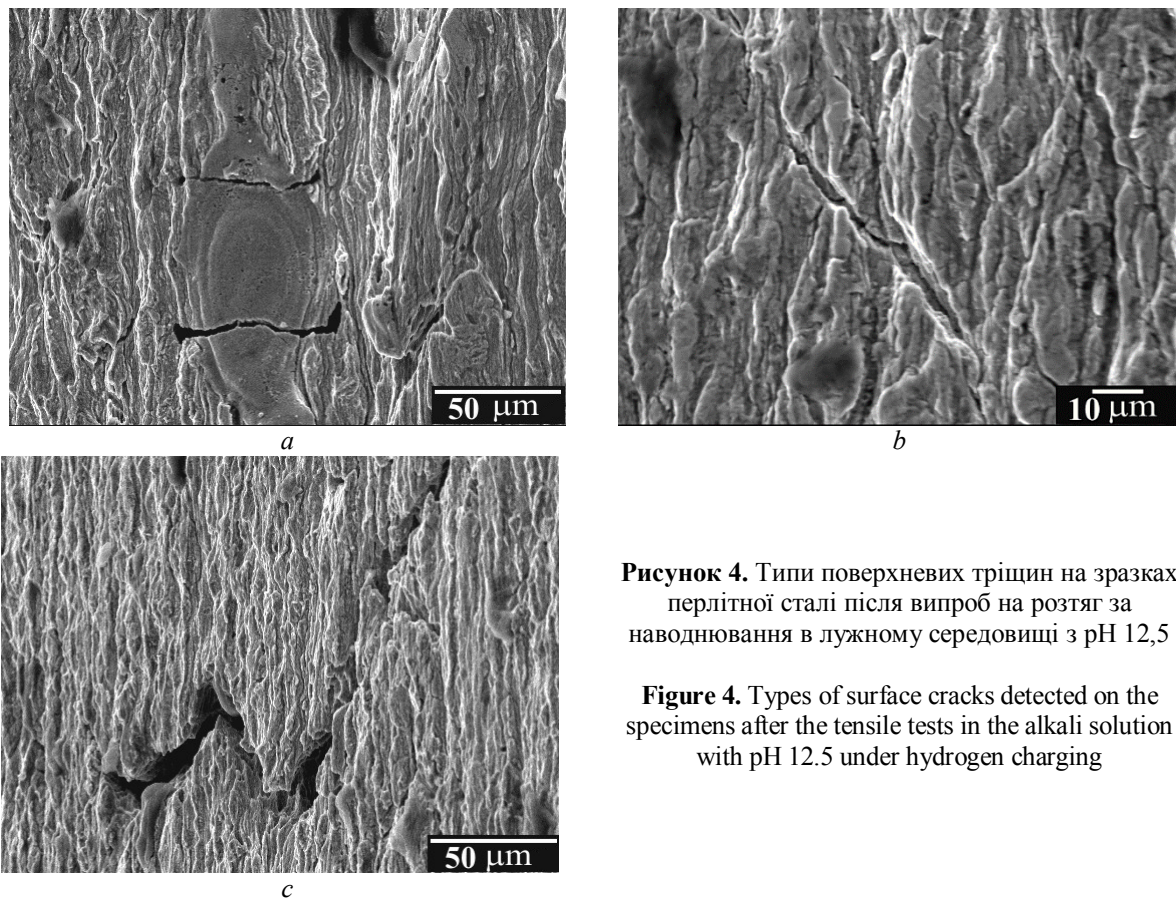
Після утворення поверхневої тріщини руйнування локалізувалося в певному перерізі зразка, а подальший розтяг неістотно впливав на зміну його геометрії. Тому в середовищі отримали низькі значення відносного звуження  $\psi^H$ , яке в цьому випадку, по суті, характеризує опірність сталі зародженню водневої тріщини. Деяке зростання  $\psi^H$  з підвищенням міри ХВ можна пояснити кращим станом бокової поверхні оброблених прутків і меншою кількістю можливих осередків тріщиноутворення.

Із практичної точки зору дуже важливо відзначити, що втрата пластичності досліджуваної сталі під впливом наводнювання (різниця між  $\psi$  та  $\psi^H$ ) є меншою в комерційному високоміщному дроті порівняно з вихідною гарячекатаною сталлю.

Незалежно від умов експерименту, сталь початкових етапів ХВ демонструє за розтягу ізотропну поведінку і відносно рівний злам у макромасштабі. З подальшою обробкою (зростанням ступеня ХВ) рельєф макрозламу стає нерівномірнішим з великою кількістю гребенів і борозенок.

Вплив наводнювання в розчині  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  на сталеві прутки проявився також множинним поверхневим мікротріскуванням, не властивим таким сталям у загально прийнятому для наводнювання розчині  $\text{NH}_4\text{CNS}$  [12]. Спостерігали три морфологічні

типи тріщин на боковій поверхні зразків поблизу зламів. Нормально орієнтовані стосовно розтягувальних напружень тріщини перетинали ділянки з мінімальною кількістю міжфазних меж, які, зазвичай, найуразливіші до дії середовищ (рис. 4 *a*). Ближче до поверхні зламу з'являлися тріщини, орієнтовані в напрямі дії тангенціальних напружень, які перетинали текстуру сталі (рис. 4 *b*). Їх виникнення пов'язано з полегшенням під дією наводнювального середовища зсувів у поверхневих шарах металу, інтенсивно наклепаного під час ХВ. Унаслідок локальних зсувів у взаємно перпендикулярних напрямках та їх злиття між собою часто виникали зигзагоподібні тріщини (рис. 4 *c*). Припустили, що за подібним механізмом зародилися і макротріщини в зразках, що сприяло розвантаженню мікрооб'ємів зразків поблизу зламу і практично припинило ріст мікротріщин в його околі за подальшого навантаження зразка до руйнування.



**Рисунок 4.** Типи поверхневих тріщин на зразках перлітної сталі після випроб на розтяг за наводнювання в лужному середовищі з pH 12,5

**Figure 4.** Types of surface cracks detected on the specimens after the tensile tests in the alkali solution with pH 12.5 under hydrogen charging

**Висновки.** Наводнення практично не впливає на характеристики міцності сталі, однак суттєво погіршує пластичність сталі за показниками відносне звуження та рівномірне видовження. Руйнування прутків на повітрі починається від центру перерізу зразка, а за катодної поляризації – ініційоване біля поверхні, що свідчить про визначальну роль поверхневих дефектів у випадку наводнювання сталевих прутків. Тріщини в попередньо наклепаному матеріалі за катодної поляризації можуть виникати внаслідок полегшення зсувів у поверхневих шарах металу під впливом наводнювання. Схильність сталі до водневого окрихчення слід враховувати за катодного та протекторного захисту залізобетонних конструкцій.

**Conclusions.** Hydrogenation has no effect on strength characteristics of the tested steel but worsens essentially its plasticity, reduction in area and uniform elongation in particular. Wires fracture in air is initiated in the central part of the specimens while under hydrogenation it originates close to the lateral surface, which proves a crucial role of surface

defects in the case of steel wires hydrogenation. Cracks in the prestressing material could appear under cathodic charging due to facilitation of share processes in the surface layers by hydrogen. Steel susceptibility to hydrogen embrittlement should be taken into account using electrochemical protection of reinforced concrete structures.

#### Список використаної літератури

1. COST Action 521 – Corrosion of steel in reinforced concrete structures: Final report [Text] / R. Cigna, C. Andrade, U. Nurnberger et al (eds.). – Luxembourg: European Communities. – 2003. – 238 p.
2. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel [Text] / G. Gabetta, H.M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 1. – С. 88 – 99.
3. Никифорчин, Г.М. Феномен прояву високотемпературної деградації зварного шва ошаднолегованої сталі [Текст] / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, А.Д. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 1. – С. 73 – 79.  
(Nykyforchyn H.M., Student O.Z., and Markov A.D. Abnormal behavior of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints // Materials Science. – 2007. – № 1. – P. 77 – 84).
4. Опір крихкому руйнуванню металу сіткової гіперболоїдної вежі Шухова [Текст] / Г.В. Кречковська, О.З. Студент, А.І. Кутний та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 4. – С. 87 – 93.  
(Brittle-fracture resistance of the metal of hyperboloid gridshell Shukhov tower // Materials Science. – 2015. – № 4. – P. 578 – 584).
5. Stress corrosion cracking of the clad structural steel after its high temperature hydrogen degradation / K. Lublinska, O. Tsyurulnyk, M. Hredil et al. // Advances in materials science. – 2007. – V. 7.–№ 1. – P. 27 – 32.
6. Студент О.З. Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики [Текст] / О.З. Студент, Л.М. Свірська, І.Р. Дзіоба // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – 48, № 2. – С. 111 – 118.  
(Student O.Z., Svirs'ka L.M., Dzioba I.R. Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics // Materials Science. – 2012. – 48, № 2. – P. 239 – 246.)
7. Toribio J., Ovejero E. Effect of cold drawing on microstructure and corrosion performance of high-strength steel // Mechanics of Time-Dependent Materials. – 1998. – № 1. – P. 307 – 319.
8. Toribio J., Ovejero E. Effect of cumulative cold drawing on the pearlite interlamellar spacing in eutectoid steel // Scripta Materialia. – 1998. – 39. – № 3. – Pp. 323 – 328.
9. Hredil M.I., Toribio J. Corrosion resistance of prestressing steel wires // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – № 5. – С. 39 – 43.
10. J. Toribio, E. Ovejero. Failure analysis of cold drawn prestressing steel wires subjected to stress corrosion cracking // Engineering Failure Analysis. – 2005. – 12. – P. 654 – 661.
11. Quantitative fractographic analysis of the fracture behaviour of progressively drawn pearlitic steels / J. Ayaso, B. González, J.C. Matos // Proc. of the 10<sup>th</sup> Portuguese Conference On Fracture. – February 22 – 24, 2006. – Guimarães, Portugal. – 9 p.
12. E. Proverbio, P. Longo. Sub critical crack growth in hydrogen assisted cracking of cold drawn eutectoid steel // Corrosion Science. – 2007. – 49. – P. 2421 – 2435.

Отримано 28.09.2015

УДК 621.181:669.018

**Леонтій Бабій, канд. техн. наук**

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

## **ТРИВАЛА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ ШВІВ ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ У ГАЗОПОДІБНОМУ ВОДНІ**

*Резюме. Оцінено тривалу міцність різних зон зварного з'єднання за статичного та повторно-статичного навантаження сталі 15Х2МФА й характеристики повзучості після випроб на повітрі та в середовищі газоподібного водню металу різних зон зварних з'єднань жароміцних конструкційних сталей*