

ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ АРМАТУРИ ЗА НАВОДНЮВАННЯ У МОДЕЛЬНОМУ РОБОЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ

М.І. Греділь

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

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 hydrogenation in the model working medium with pH 12.5. All tested wires are highly susceptible to hydrogen assisted cracking. Embrittlement reveals itself in substantial decrease of plasticity characteristics and plural microcracking near the fracture surfaces.

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). Внаслідок ХВ покращуються механічні характеристики сталі – твердість, границя плинності і границя міцності зростають.

Арматура в бетоні знаходиться у пасивному стані, що зумовлено сильно лужною реакцією порової рідини на межі арматура – бетон. Однак упродовж експлуатації рН середовища понижується через карбонізацію бетону та проникнення іонів хлору. Відомо, що високоміцні сталі особливо чутливі до впливу середовища, а особливо до водневого окрихчення, що може виникати внаслідок наводнювання сталі під дією катодного захисту залізобетонної конструкції.

У роботі проаналізовано відмінності в механічній поведінці та закономірності руйнування попередньо напружених прутків перлітної сталі на повітрі та в модельному робочому середовищі.

Матеріали та методи досліджень. Використали циліндричні зразки з сталі після різних етапів технологічного процесу ХВ, а також зразки вихідного гарячекатаного прутка і готового комерційного продукту. Вивчали евтектоїдну перлітну сталь, яка пройшла сім етапів ХВ. Внаслідок обробки перлітні колонії поступово переорієнтовуються у напрямку осі дроту (напрямку волочіння). Їх орієнтація стосовно осі стержня залежить від ступеня волочіння [1]. Водночас відбувається потоншення самих колоній, а також зменшується відстань між пластинками, і вони орієнтуються в напрямку волочіння [2]. 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 $\epsilon^{nl} = 2\ln(D_0/D_i)$, де D_0 та D – початковий та кінцевий діаметр прутка відповідно, а також діаметр прутків подані в Табл. 1, де номерами позначено етапи ХВ.

Табл. 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
ϵ^{nl}	0,00	0,22	0,42	0,59	0,78	0,97	1,13	1,57

Чутливість досліджуваного матеріалу до водневого окрихчення визначали методом повільного розтягу зі швидкістю 10^{-7} c^{-1} циліндричних зразків довжиною 30 см та діаметром, рівним діаметру відповідного прутка. Початкова відстань між затискачами 22 см. Зразки не полірували, а лише обезжирювали 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 $-1,2 \text{ В}$, обраний на основі

попередніх досліджень [3, 4], підтримували потенціостатом. Досліджували принаймні три зразки кожного виду, результати усереднювали.

Результати та 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 ϵ однозначно знижується. Винятком є комерційний дріт, який після ХВ за технологією проходить певну термообробку для зняття залишкових напружень.

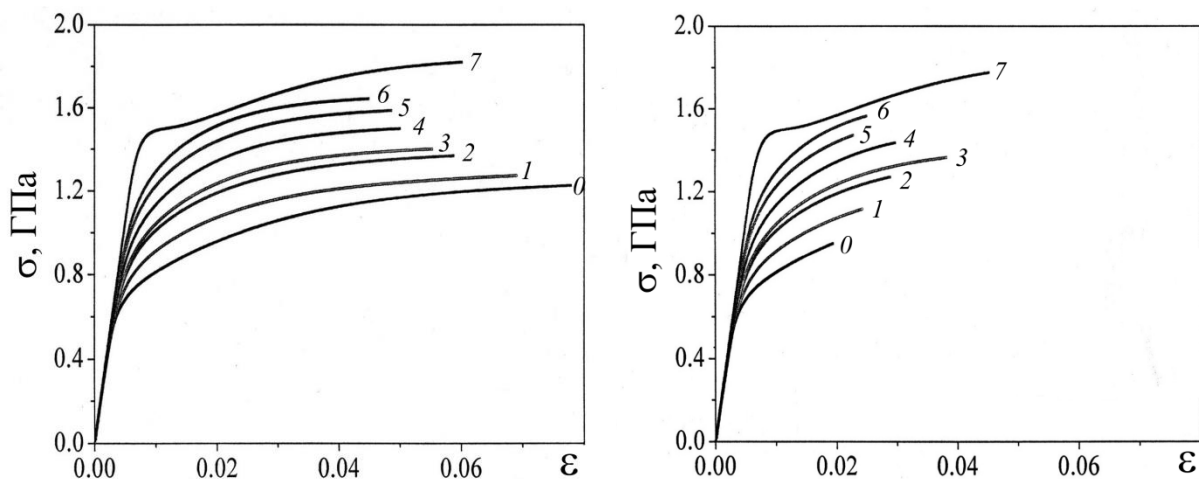


Рис. 1. Криві розтягу евтектоїдної перлітної сталі на повітрі [5] (а) та за наводнювання в лужному середовищі з рН 12,5 (б).
Номери на рисунку відповідають етапам ХВ.

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 [3].

Відносне звуження на повітрі загалом зростає з 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 [5].

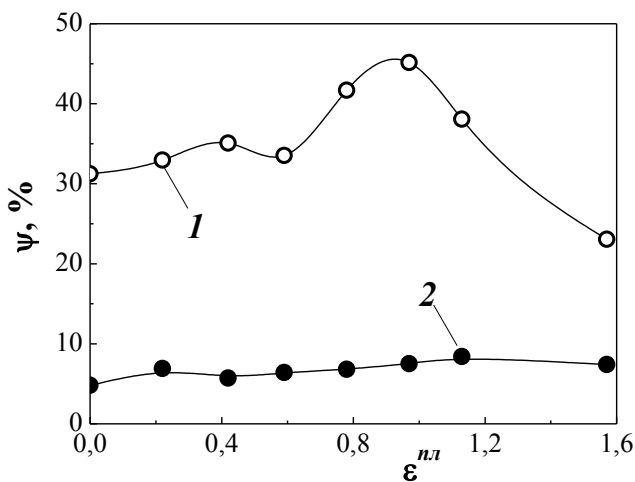


Рис. 2. Втрати пластичності досліджуваної сталі внаслідок наводнювання в середовищі $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з рН 12,5 (крива 2) порівняно з випробами на повітрі (крива 1).

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 волочиння [1]. При цьому зростає і відносне звуження ψ . Після етапу 5, очевидно, досягнуто максимальної переорієнтації перлітних колоній, тому подальша обробка сталі приводить до деякого зниження пластичності навіть при зростанні величини накопиченої пластичної деформації. На противагу випробам на повітрі, в середовищі спостерігали стабільно низьке значення ψ^H . (рис. 2, крива 2), що підтверджує значну чутливість матеріалу до водневого окрихчення, виявлену в [4].

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. 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 ψ^H , яке в цьому випадку, по суті, характеризує опірність сталі зародженню водневої тріщини. Деяке зростання ψ^H з підвищенням міри ХВ можна пояснити кращим станом бокової поверхні оброблених прутків і меншою кількістю можливих осередків тріщиноутворення.

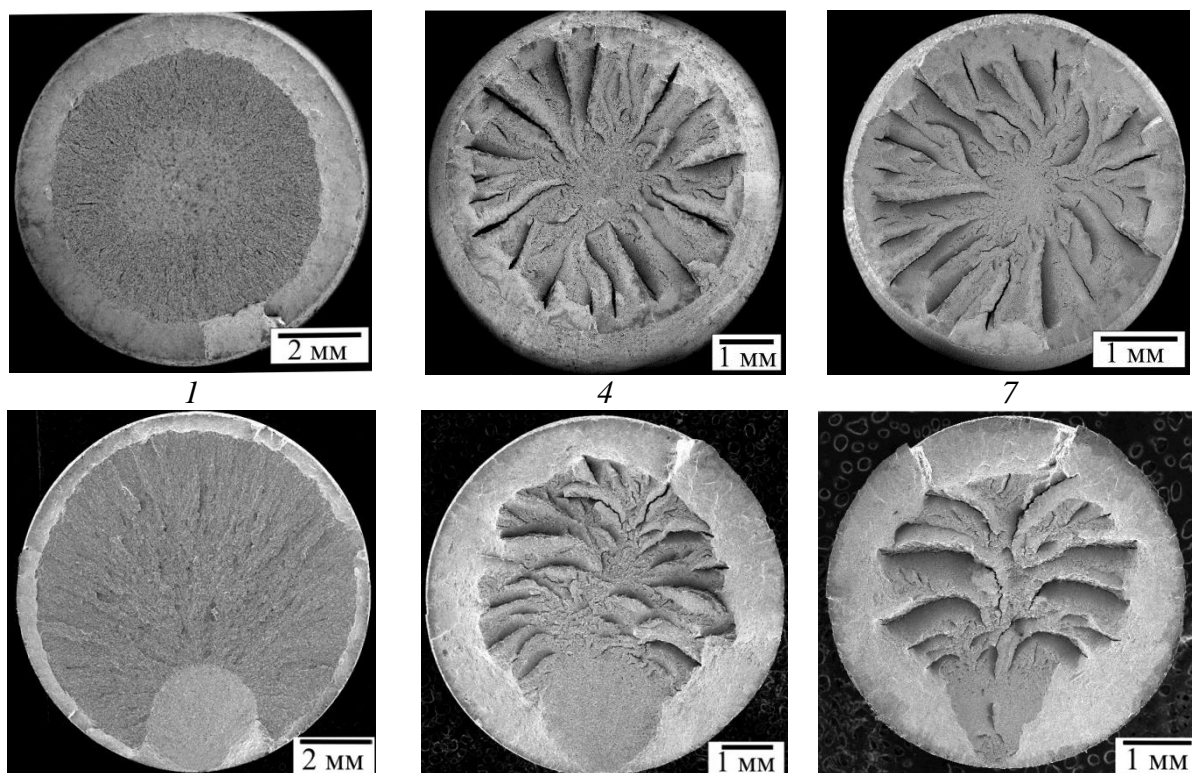


Рис. 3. Макрозлами зразків перлітної сталі після випроб на повітрі (верхній ряд) та за наводнювання (нижній). Цифри відповідають етапу холодного волочиння.

Із практичної точки зору дуже важливо відзначити, що втрата пластичності досліджуваної сталі під впливом наводнювання (різниця між ψ та ψ^H) є меншою в комерційному високоміцному дроті порівняно з вихідною гарячекатаною сталлю. Незалежно від умов експерименту, сталь початкових етапів ХВ демонструє за розтягу ізотропну поведінку і відносно рівний злам в макромасштабі. З подальшою обробкою (зростанням ступеня ХВ) рельєф макрозламу стає нерівномірнішим з великою кількістю гребенів і борідок.

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 NH_4CNS [6]. 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,

звичку, найуразливіші до дії середовищ (рис. 4 а). Ближче до поверхні зламу з'являлися тріщини, орієнтовані в напрямі дії тангенціальних напружень, які перетинали текстуру сталі (рис. 4 б). Їх виникнення пов'язано з полегшенням під дією наводнювального середовища зсувів у поверхневих шарах металу, інтенсивно наклепаного під час ХВ. Внаслідок локальних зсувів у взаємноперпендикулярних напрямках та їх злиття між собою часто виникали зигзагоподібні тріщини (рис. 4 в). 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.

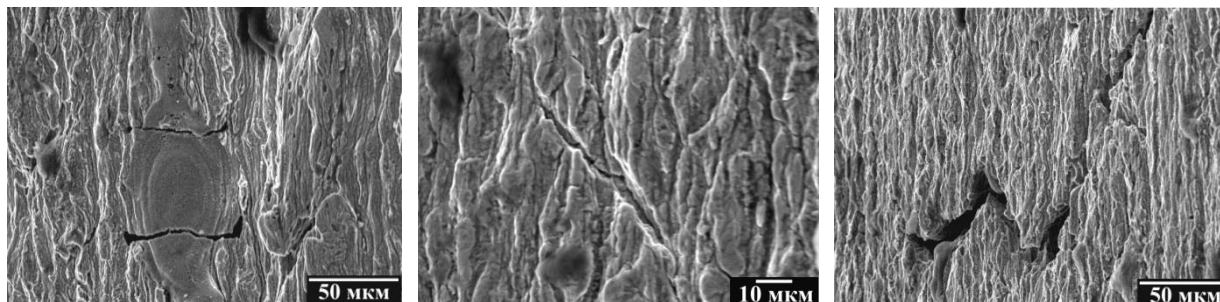


Рис. 4. Типи поверхневих тріщин на зразках перлітної сталі після випроб на розтяг за наводнювання в середовищі з рН 12,5.

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

Література

1. 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.
2. 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.
3. Hredil M.I., Toribio J. Corrosion resistance of prestressing steel wires // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – №5. – С. 39–43.
4. 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.
5. Quantitative fractographic analysis of the fracture behaviour of progressively drawn pearlitic steels / J. Ayaso, B. González, J.C. Matos // *Proc. of the 10th Portuguese Conference On Fracture*. – February 22–24, 2006. – Guimarães, Portugal. – 9 p.
6. E. Proverbio, P. Longo. Sub critical crack growth in hydrogen assisted cracking of cold drawn eutectoid steel // *Corrosion Science*. – 2007. – **49**. – P. 2421–2435.