

УДК 620.1:691.714

М.І. Греділь**ЕВОЛЮЦІЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУТКІВ АРМАТУРНОЇ СТАЛІ ВНАСЛІДОК ХОЛОДНОГО ВОЛОЧІННЯ**

У роботі на основі літературних даних та власних результатів наведено загальні закономірності зміни основних механічних характеристик перлітної сталі внаслідок процесу холодного волочіння. Показано, що міцність і пластичність сталі зростають до певної межі завдяки одночасному наклепу і переорієнтуванню перлітних зерен у напрямі осі прутка. Подальше зміцнення сталі призводить до певної втрати пластичності. Поступово набута анізотропія властивостей перлітної сталі виявляється на макрофрактограмах зростанням рельєфності зламу.

Ключові слова: перлітна сталь, холодне волочіння, механічні властивості, аналіз макрозламів.

Рис. 3. Літ.5.

M.I. Hredil**EVOLUTION OF STRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PEARLITIC REINFORCING STEEL WIRES DUE TO COLD DRAWING**

General regularities of changes in the main mechanical characteristics of pearlitic steel due cold drawing process are given in this work on the basis of both literature data and own results. It was revealed that steel's strength and plasticity rise up to a certain level thanks to simultaneous cold work and rearrangement of pearlitic grains into the wire's main axis direction. Subsequent strengthening of steel leads to the certain loss of plasticity. Progressively grown properties anisotropy of pearlitic steel reveals itself on macrofracture maps by relief enhancement.

Keywords: pearlitic steel, cold drawing, mechanical properties, macrofracture maps analysis.

М.И. Гредиль**ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУТКОВ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ХОЛОДНОГО ВОЛОЧЕНИЯ**

В работе на основе литературных данных и собственных результатов приведены общие закономерности изменения основных механических характеристик перлитной стали в результате процесса холодного волочения. Показано, что прочность и пластичность стали повышается до некоторого уровня благодаря одновременному наклепу и переориентации перлитных зерен в направлении оси прутка. Постепенно приобретаемая анизотропия свойств перлитной стали отображается на макрофрактограммах нарастанием рельефности излома.

Ключевые слова: перлитная сталь, холодное волочение, механические свойства, анализ макроизломов.

Вступ. З огляду на великі об'єми будівельних робіт, і відповідно, постійно зростаючі потреби в залізобетоні, пошук шляхів економії арматури є надзвичайно важливим завданням. Відомо, що розхід арматурної сталі для звичайних залізобетонних (ЗБ) конструкцій становить близько 75 кг на 1 м³ конструкції [1]. Суттєвого зменшення металоємності ЗБ конструкцій досягають використанням зміцненої арматури. Для підвищення міцності гарячекатану арматурну сталь піддають холодному волочінню (ХВ), що являє собою спосіб обробки металу протягуванням заготовки через конічний отвір у волочильній машині (фільєру). У прутку під час проходження через фільєру виникають пластичні деформації. Напруження при цьому змінюється від стискального біля поверхні прутка до розтягувального в центрі виробу [2]. Допустиме відносне обтискання сталі за один прохід знаходиться в межах 10–20%, тому для отримання тонких прутків заготовку протягують через кілька послідовних отворів, щоразу менших.

Внаслідок ХВ покращуються загальноприйняті механічні характеристики сталі: границя плинності і границя міцності зростає, тоді як модуль Юнга залишається незмінним. Крім того, досягається значне покращення стану поверхні прутка, однак під час обробки можлива поява поверхневих дефектів, які в процесі тривалої експлуатації можуть вплинути на тримку здатність прутків. Найчастіше зустрічаються подряпини і риси, зумовлені поганою поліровкою волочильного отвору, його забруднення або надриву. Відомо також, що високоміцні холоднотягнуті сталі чутливіші до дії водню, джерелом якого можуть бути робоче середовище за умов катодного захисту, появляється електрохімічна неоднорідність [3], і це спонукає детальніше проаналізувати зміну властивостей сталі внаслідок ХВ.

У роботі проаналізовано особливості механічної поведінки та руйнування прутків арматурної перлітної сталі на кожному етапі процесу холодного волочіння.

Методики і матеріали. Досліджували перлітну арматурну сталь після різного ступеня ХВ. Випробували циліндричні зразки з різних етапів реального технологічного процесу, включно з вихідною гарячекатаною сталлю та кінцевим комерційним продуктом (попередньо напруженим

прутком). Хімічний склад досліджуваної сталі, мас. %: 0,789 С; 0,681 Мп; 0,21 Si; 0,010 Р; 0,008 S; 0,003 Al; 0,218 Cr; 0,061 V; решта Fe. Сталь пройшла через сім етапів процесу холодного волочіння. Пластичну деформацію, акумульовану в сталі на кожному етапі та визначену за формулою $\epsilon^{pl} = 2 \ln(D_0 / D_i)$, а також відповідний діаметр прутка наведено у Таблиці (D_0 та D – початковий і кінцевий діаметри прутка відповідно).

Таблиця 1.

Діаметр досліджених прутків та відповідний рівень накопиченої пластичної деформації

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^{pl}	0,00	0,22	0,42	0,59	0,78	0,97	1,13	1,57

* Примітка. Номер сталі відповідає етапу ХВ

Стандартні механічні характеристики сталі визначали за повільного розтягу (10^{-7} c^{-1}) гладких циліндричних зразків довжиною 30 мм та діаметром, рівним діаметру відповідного прутка. Початкова відстань між захватами 220 мм. Для механічних випробувань застосовували статичну випробувальну машину MTS Alliance RT/100 з програмним забезпеченням TESTWORKS 4**. Випробовували принаймні три зразки кожного виду, отримані результати усереднювали. Мікроструктуру та злами зразків досліджували на сканівному електронному мікроскопі.

Результати і обговорення. Досліджувана евтектоїдна сталь має перлітну мікроструктуру (рис. 1), основою якої є перлітні колонії, сформовані паралельно розміщеними пластинками перліту і цементиту, що чергуються, і орієнтовані довільно відносно сусідніх колоній. У вихідній сталі (гарячекатаній) перлітні колонії зорієнтовані хаотично як у поздовжньому, так і в поперечному напрямі (рис. 1 а, б) Внаслідок ХВ вони поступово переорієнтовуються і витягуються у напрямку осі дроту (напрямку волочіння). Їх орієнтація стосовно осі стержня залежить від ступеня волочіння [4 –6]. Водночас відбувається потоншення самих колоній, а також зменшується відстань між пластинками, і вони орієнтуються в напрямку волочіння (рис. 1 в). У поперечному напрямі (рис. 1 г) колонії деформуються стиском, формуючи специфічну мікроструктуру, що характеризується дещо вищою порівняно з вихідним станом електрохімічною активністю [3].

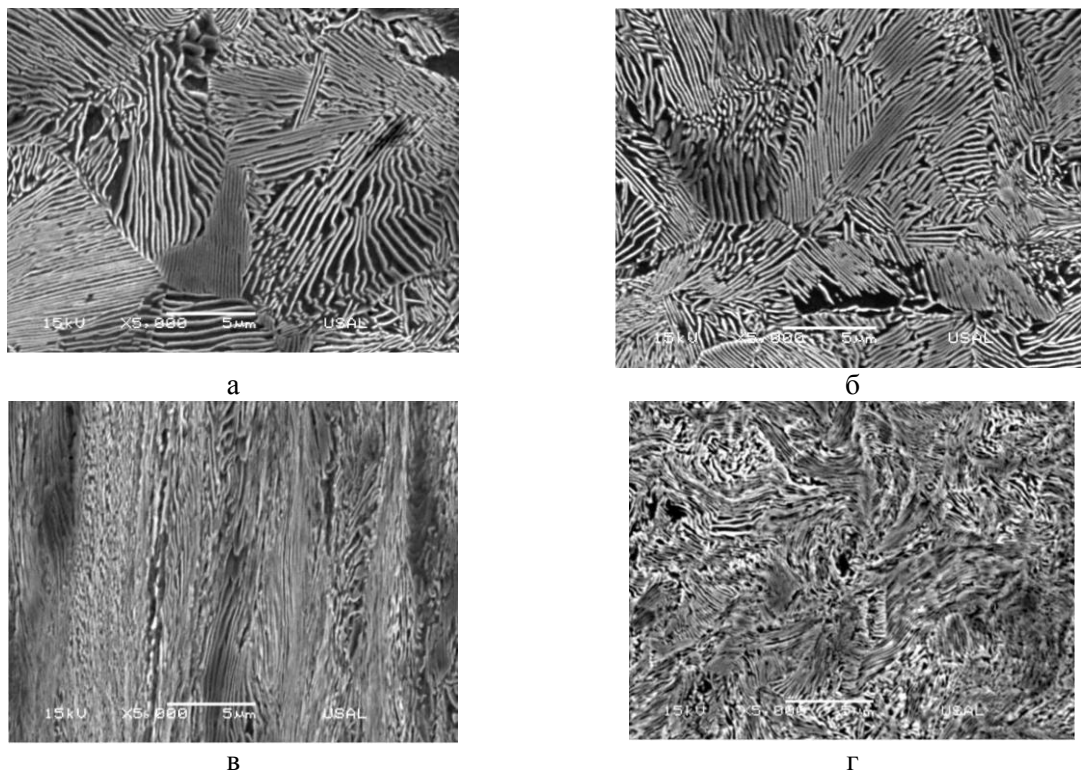


Рис. 1. Мікроструктура перлітної арматурної сталі до (а, б) та після (в, г) ХВ у поздовжньому (а, в) та поперечному (б, г) напрямках відносно осі прутка

** Робота виконана в Університеті м. Саламанки, Іспанія, на обладнанні групи Руїнування та міцності конструкційних матеріалів

Результати механічних випроб наведено на рис. 2. Зміна характеристик сталі представлена як функція накопиченої пластичної деформації. Міцність сталі плавно зростає з кожним етапом ХВ за рахунок наклепу. В результаті комерційний дріт, отриманий після останнього протягування, має границю текучості вищу в 1,6 разів і границю міцності в 1,3 рази порівняно з вихідним прутком.

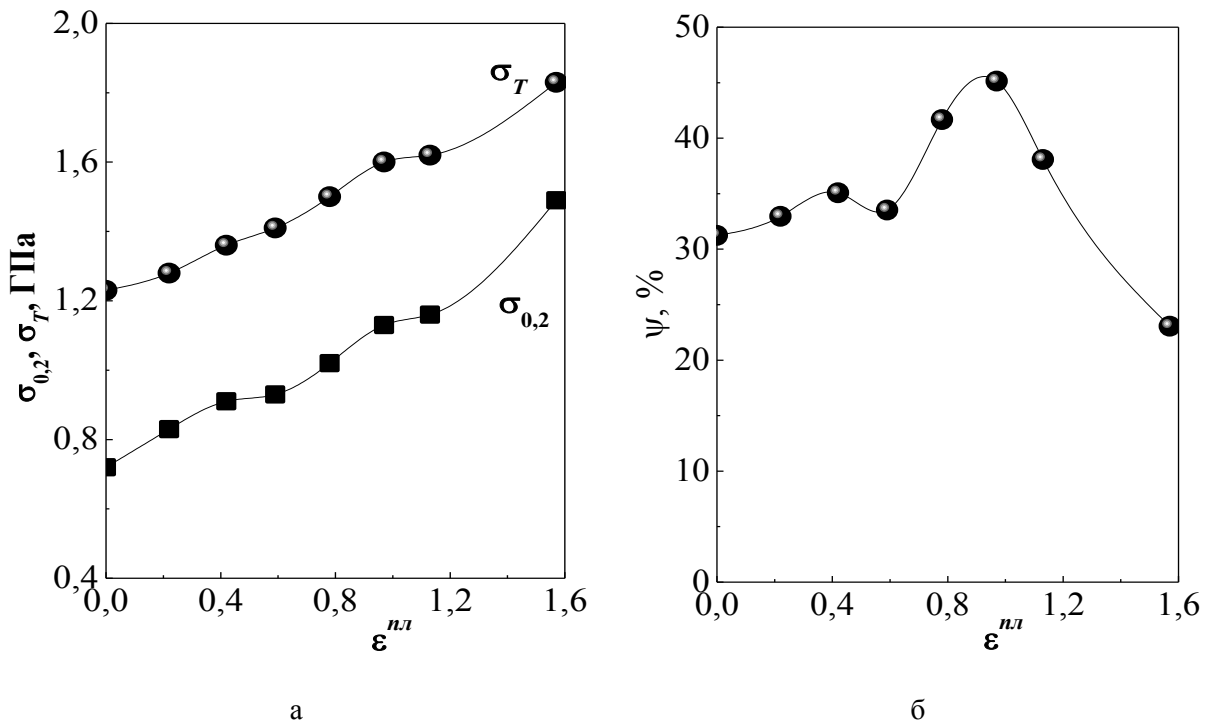


Рис. 2. Зміна характеристик міцності (а) і пластичності (б) арматурної перлітної сталі внаслідок холодного волочіння

Відносне звуження загалом зростає з ступенем ХВ (рис. 2 б). Однак на останніх етапах процесу спостерігається деяке пониження ψ . Таку поведінку сталі пояснюють сумісним впливом накопичених пластичних деформацій та переорієнтування перлітних колоній [7]. Під час холодного волочіння відбувається два принципових процеси – накопичення пластичної деформації (наклеп) та переорієнтація мікроструктурних складових. З кожним технологічним етапом перлітні колонії поступово орієнтуються у напрямі, паралельному до поздовжньої осі прутка доти, поки практично усі вони не будуть розміщені в напрямі холодного волочіння. При цьому зростає і відносне звуження. 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 початкових етапах холодного волочіння перлітна сталь демонструє ізотропну поведінку і відносно гладкий злам в макромасштабі (рис. 2 0–2). З подальшою обробкою рельєф руйнування змінюється, як і механічна поведінка сталі. На фратограмах злами стають нерівномірніші з великою кількістю гребенів і боріздок. Злам у кожному випадку є симетричний. Загалом тут можна виділити три характерні зони руйнування: центральна, звідки починається руйнування; зона стабільного росту тріщин з гребенями, які розходяться в радіальному напрямі до периферії, і зовнішній конус (долам). Для плоскої в макромасштабі центральної зони характерний в'язкий волокнистий злам, тоді як зона росту тріщини виказує змішаний механізм руйнування. Відсоткове співвідношення між усіма зонами не є сталим і змінюється від етапу до етапу ХВ. Зокрема, можна зауважити зростання відносної площі зовнішнього конуса, що, беручи до уваги тенденцію зміни відносного звуження, є ознакою зростання пластичності сталі.

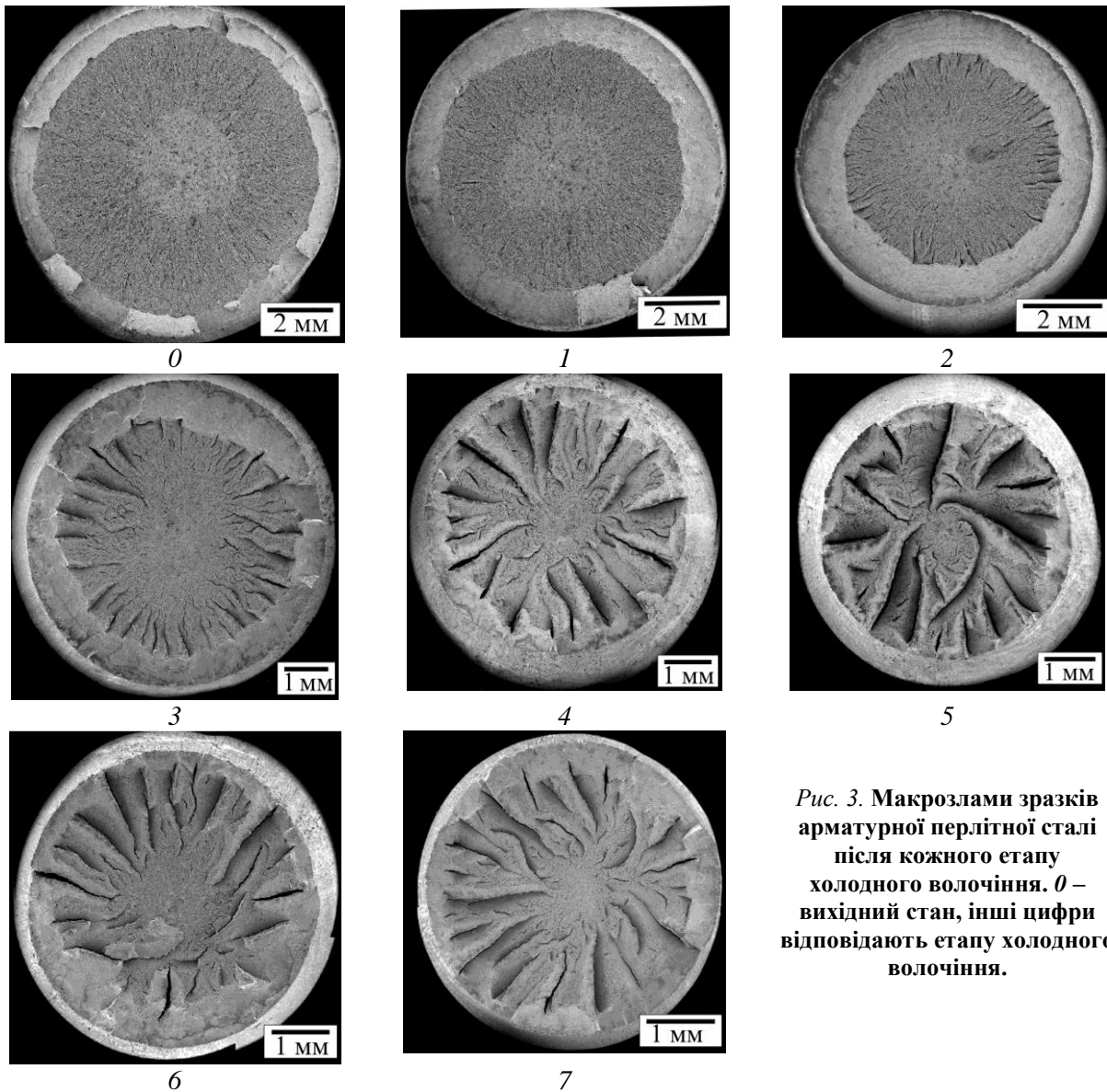


Рис. 3. Макрозлами зразків арматурної перлітної сталі після кожного етапу холодного волочіння. 0 – вихідний стан, інші цифри відповідають етапу холодного волочіння.

Висновки. Внаслідок холодного волочіння перлітної арматурної сталі границя міцності зростає в 1,3 рази, а границя текучості – в 1,6 разів при незначній втраті пластичності. Така комбінація механічних характеристик досягається завдяки поступовому переорієнтуванню перлітних зерен у напрямі основної осі прутка (напрямку волочіння). Одночасно відбувається потоншення феритних і цементитних пластинок усередині перлітних колоній і видовження їх в напрямі основної осі. Повнота переорієнтування структурних складових залежить від ступеня ХВ. При цьому сталь набуває анізотропних властивостей, що відображається на макрофрактограмах зростанням рельєфності зламу.

1. Алексеев А.А. Технология и организация сельского строительства. – М.: Стройиздат, 1983. – 440 с.
2. Toribio J., Gonzalez B., Matos J.-C. Micro- i macro-analysis of the fatigue crack growth in pearlitic steels // Ciencia e Tecnologia dos Materiais. – 2008. – V. 20, N. 1/2. – Pp. 68–74.
3. Hredil M.I., Toribio J. Corrosion resistance of prestressing steel wires // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – №5. – С. 39–43.
4. 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.
5. 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.
6. J. Toribio, F.J. Ayaso. Anisotropic fracture behaviour of cold drawn steel: a materials science approach // Materials Science and Engineering A. – 2003. – 343. – Pp. 265–272.
7. 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.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2015.