

Е.В. Парусов, к.т.н., с.н.с., зав.відд., ORCID 0000-0002-4560-2043

І. М. Чуйко, к.т.н., с. н. с, ORCID 0000-0002-4753-614X

В.А. Луценко, д. т. н., с. н. с, пров. н. с., ORCID 0000-0002-4604-5592

О.В. Парусов, к. т. н., с. н. с., ORCID 0000-0002-9879-6179

Т.М. Голубенко, к. т. н., с. н. с., ORCID 0000-0002-3583-211X

О.В. Луценко, к. т. н., н. с., ORCID 0000-0001-8298-5306

Г.І. Сівак, н.с, ORCID 0000-0001-6948-7732

Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА МІНЛИВІСТЬ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОПРОКАТУ

Анотація. Арматурний і бунтовий прокат має схильність до знеміцнення протягом часу. Після витримування при кімнатній температурі пластичність прокату може бути частково відновлена за рахунок процесів звороту та релаксації, а також виділення зі сталі дифузійно-рухомого водню. При виробництві термічно зміцненого прокату часто спостерігається явище зворотної водневої крихкості та старіння. Було вивчено мінливість механічних властивостей арматурного й бунтового прокату зі сталі 25Г2С, С70D і С82D різного діаметру. Показано, що схильність до знеміцнення зменшується при підвищенні класу міцності арматурного прокату (сталь 25Г2С), що пов'язано виділенням водню різної кількості. Динаміка збільшення відносного подовження для арматурного прокату виявляється максимальною в перші 30 діб та інтенсивно зростає (до 4,0...4,5 % абс.) протягом 90...120 діб, надалі стабілізується й практично не змінюється в часі. Після застосування прискореного охолодження на завершальній стадії деформаційно-термічної обробки бунтового прокату з високовуглецевої сталі С70D мінливість відносного видовження й відносного звуження характеризується суттєвим збільшенням показників пластичності протягом 3 діб після первинних випробувань. Дослідженнями мінливості механічних властивостей бунтового прокату зі сталі С82D встановлено, що при первинних випробуваннях зразків (безпосередньо після прокатки) фіксуються низькі значення відносного видовження та відносного звуження (7,6...8,4 % і 15...24 % відповідно), при цьому розвиток окрихчування має тенденцію до зростання зі збільшенням діаметру. Після витримування бунтового прокату протягом 48...72 годин параметри пластичності для всіх діаметрів прокату зростають до 30...34 % і стабілізуються в часі. Показано, що мінливість механічних властивостей протягом часу має безпосередній зв'язок із параметрами структури, початковим вмістом водню в сталі та зі ступенем деформаційного опрацювання безперервною технологією.

Ключові слова: арматурний прокат, бунтовий прокат, клас міцності, механічні властивості, границя плинності, відносне видовження

Посилання для цитування: Парусов Е.В., Чуїко І.М., Луценко В.А., Парусов О.В., Голубенко Т.М., Луценко О.В., Сівак Г.І. Вплив технології термічного зміцнення на мінливість механічних властивостей металопрокату. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. - Вип.34. – С. 202-218. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-202-218

Стан питання. Металургійна практика виробництва арматурного й бунтового прокату свідчить про те, що безпосередньо після гарячої пластичної деформації найчастіше спостерігається мінливість механічних властивостей готових металовиробів. З плином часу пластичність, а в деяких випадках і міцність сталі зростають [1]. Вказане явище найбільш повною мірою простежується при виробництві високоміцних класів прокату, при цьому його прояв має доволі різний характер і залежить головним чином від хімічного складу сталі та параметрів режиму остаточної термічної обробки. При цьому суттєвий вплив на мінливість механічних властивостей сталей чинять процеси старіння, звороту та релаксації напружень, останнє зокрема частково обумовлене впливом водню [2]. Арматурний і бунтовий прокат відносять до масових видів продукції чорної металургії, що знаходить широке застосування в різноманітних галузях промисловості. Нині найбільш затребуваним є арматурний прокат класів міцності А400...А1000. Технологія термічного зміцнення арматурних сталей у потоці прокатних станів дозволяє збільшити показники пластичності та забезпечити збереження заданого рівня міцності при нагріванні до певних температур [3, 4]. Термічно зміцнений прокат відносять до високоефективної й надійної металопродукції, яка використовується при спорудженні різноманітних будівель і конструкцій. Незважаючи на вказані переваги, існують певні недоліки, зокрема термічне зміцнення сталей обумовлює посилення чутливості до підвищеного вмісту водню, який впливає на експлуатаційні властивості готових металовиробів. Воднева крихкість арматурних сталей характеризується суттєвим зменшенням показників їх пластичності [1-6]. Наприклад, при впровадженні промислової технології термічного зміцнення арматури зі сталей 20ГС, 20ГС2 та 25Г2С авторами роботи [4] було встановлено негативний вплив водню на пластичність прокату. Виробництво арматурних сталей відрізняється від виготовлення високоякісного сортаменту сталей, тому застосування вакуумування є економічно недоцільним технологічним кроком. Враховуючи викладене, для зменшення вмісту водню в сталі при виробництві термічно зміцненого арматурного прокату на практиці були запропоновані наступні рішення: 1) дегазація шляхом витримки заготовок при температурі вище 400 °С [7]; 2) дегазація шляхом витримки заготовок при температурі 900...1000 °С протягом 3...6 годин [8]; 3) повільне охолодження

заготовок зі швидкістю 0,005...0,006 °C/с в інтервалі температур 850...600 °C [9,10]. Однак найбільше поширення отримав пасивний спосіб боротьби з водневою крихкістю, який полягає у витримванні при кімнатній температурі заготовок перед початком гарячої пластичної деформації та готового прокату з метою досягнення заданого рівня механічних властивостей [11-13]. З огляду на те, що такий підхід почали широко використовувати на практиці, стандартами ГОСТ 10884-94 та ДСТУ 3760:2006 при виробництві високоміцної арматури передбачено зменшення відносного подовження безпосередньо після прокатки на 1,0 % від регламентованих вимог, а, згідно до стандарту Великої Британії BS 4449:2005 «Сталь для армування бетону», перед визначенням механічних властивостей прокату застосовують штучне старіння [14].

Таким чином, доцільно дослідити вплив пасивного способу боротьби з водневою крихкістю на мінливість механічних властивостей прокату різних класів міцності.

Мета роботи: дослідження мінливості механічних властивостей металопрокату в залежності від технології термічного зміцнення.

Методика досліджень. При проведенні досліджень використані промислові зразки арматурної сталі номінальним діаметром 12,0 мм класів міцності А400...А1000 та бунтового прокату діаметром 5,5...12,0 мм із високовуглецевих сталей С70D та С82D, які були піддані витримванню при температурі ~ 20 °C. Механічні властивості прокату визначали за допомогою розривної машини «EU-100» відповідно до вимог стандарту ГОСТ 1497-84. При визначенні механічних властивостей прокату використовували потрібну кількість зразків, у відповідності до яких визначили максимальне, середнє й мінімальне значення.

Результати досліджень. Відомо, що з підвищенням у сталі вмісту марганцю й кремнію (марки 35ГС та 25Г2С) розпад аустеніту при охолодженні на повітрі відбувається за проміжним механізмом [15]. На відміну від технології термічного зміцнення за схемою перерваного (переривчастого) загартування з самовідпуском, коли в поперечному перерізі прокату формується шарувата квазікомпозитна структура [16], яка складається з суміші бейніту, перліту та дрібнозернистої ферито-перлітної структури, в гарячекатаному прокаті утворюється верхній (перистий) бейніт, а перліт розташовується у вигляді сітки по границях зерен. Після витримвання близько трьох-чотирьох тижнів пластичність прокату може бути частково відновлена за рахунок процесів звороту та релаксації, а також виділення зі сталі дифузійно-рухомого водню. Доволі часто при виробництві гарячекатаного арматурного прокату спостерігається явище оборотної водневої крихкості та старіння [17-20]. Аналіз вказаних літературних джерел дозволяє зробити висновок, що водневе старіння є характерним для

гарячекатаних низьколегованих марганцевих і кремнемарганцевих сталей, які не піддаються інтенсивному охолодженню, й характеризується спочатку зменшенням показників міцності до деякого мінімального значення з подальшим підвищенням, після чого, як правило, не змінюється. Поведінка відносного видовження при цьому інша: виділення водню стимулює збільшення пластичності, яке досягає певного рівня й стабілізується в часі. Максимальне підвищення пластичності відповідає видаленню дифузійно-рухомого водню в кількості ~ до 85 % [13]. Подальший вміст водню в прокаті може зменшуватися без суттєвої зміни показників пластичності. Протягом часу можливе протікання природного старіння, яке має як негативний (підвищення міцності зі зменшенням пластичності), так і позитивний вплив (з підвищенням міцності відносно подовження зростає або не змінюється).

Зворотна воднева крихкість зумовлена наступним: атомарний водень, який переходить у молекулярний стан і знаходиться в різного типу «пастках» (залишки зони стовпчастих кристалів в структурі прокату, неметалеві включення, недосконалість кристалічної будови тощо), створює залишкові напруги, в результаті чого показники пластичності зменшуються [20]. При дифузійному виділенні водню протягом певного часу в прокаті відбувається релаксація напружень, які були обумовлені впровадженням водню, в результаті чого виникають умови для перерозподілу дефектів кристалічної будови (головним чином дислокацій). Саме в цей період відбувається зменшення показників міцності, особливо, границі плинності. Після перерозподілу дислокацій настає момент, коли їх подальше переміщення ускладнюється, а границя плинності зростає й стабілізується на певному рівні [13].

На рис. 1 наведена мінливість показників міцності (σ_B , σ_T) гарячекатаного арматурного прокату діаметром 12,0 мм зі сталі 25Г2С (клас міцності А400) по відношенню до результатів первинних випробувань безпосередньо після прокатки (значення по осі ординат із індексом «0»). З аналізу графічних залежностей випливає, що приблизно на 20-ту добу відбувається зменшення значень тимчасового опору руйнуванню (мінімальне та середнє значення), при цьому максимальне зменшення $\Delta\sigma_0$ становить – 30 МПа, при середньому значенні – 12 МПа. В той же час на деяких зразках зафіксовано зростання $\Delta\sigma_0$ на + 11 МПа. Протягом 20...100 діб мінімальні значення зростають до – 14 МПа і настає їх відносна стабілізація на ~ 150-ту добу в порівнянні з результатом первинних випробувань.

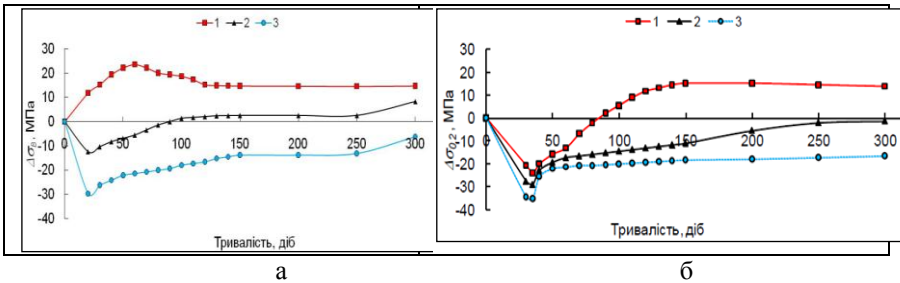


Рисунок 1 – Мінливість тимчасового опору руйнуванню та границі плинності арматурного прокату зі сталі 25Г2С (клас А400) в залежності від часу витримування: а – тимчасовий опір руйнуванню; б – границя плинності; 1, 2, 3 – максимальне, середнє й мінімальне значення відповідно

Надалі мінімальні значення $\Delta\sigma_B$ монотонно підвищуються й на 300-ту добу тимчасовий опір руйнуванню несуттєво відрізняється (-6 МПа) від результатів первинних випробувань. Середні значення $\Delta\sigma_B$ змінюються за аналогією з мінімальними й після 85 дб досягають значень, які отримані при первинних випробуваннях, потім стабілізуються на протяжці 110...250 дб на одному рівні ($\sim +3$ МПа), а в інтервалі 250...300 дб зростають до $+9$ МПа. Максимальні значення $\Delta\sigma_B$ мають більш складну залежність: спочатку приблизно до 60-ї доби тимчасовий опір руйнуванню зростає до $+24$ МПа, а потім знижується й стабілізується на позначці $+15$ МПа приблизно після 150 дб. Можна припустити, що «смуга мінливості» (діапазон між максимальними та мінімальними значеннями $\Delta\sigma_B$) може бути зумовлена похибкою випробувань та впливом технологічних параметрів, але відповідно до графічних даних простежується певна закономірність: після завершення 60 дб розбіг значень між максимальними та мінімальними значеннями $\Delta\sigma_B$ починає монотонно зменшуватися (див. рис. 1, а).

Мінливість значень $\Delta\sigma_{0,2}$ протягом часу в цілому схожа на поведінку кривих мінливості $\Delta\sigma_B$, але зміна границі плинності має деякі свої особливості: максимальне, середнє й мінімальне значення характеризуються одночасним різким зменшенням (-35 МПа, -29 МПа і -24 МПа відповідно) приблизно на 40-ву добу по відношенню до результатів первинних випробувань. Надалі максимальні значення $\Delta\sigma_{0,2}$ зростають, на 85-ту добу відповідають результатам первинних випробувань, а на 150-ту добу підвищуються до $+15$ МПа і стабілізуються протягом часу. Середні значення $\Delta\sigma_{0,2}$, починаючи з 40-ї доби, монотонно зростають і практично досягають результатів первинних випробувань протягом 250...300 дб. Абсолютна зміна смуги мінливості

досягає мінімуму (6 МПа) на 40-ву добу, потім досягає максимуму на 150-ту добу (34 МПа), надалі стабілізується й на 300-ту добу становить 30 МПа.

Мінливість відносного видовження для арматурного прокату зі сталі 25Г2С наведена на рис. 2. Згідно з аналізом графічної залежності, стає очевидним, що відносне видовження з плином часу зростає й стабілізується на 15...20-ту добу, що обумовлено виділенням водню й релаксацією структурних напружень. Зростання δ_5 за середніми значеннями складає до 10 %, а смуга мінливості досягає мінімуму після витримування протягом 60 діб. Отже, оцінку механічних властивостей арматурного прокату можливо проводити за усередненими значеннями для кожного з конкретних видів випробувань (криві з індексом «2» на рис. 1 і рис. 2).

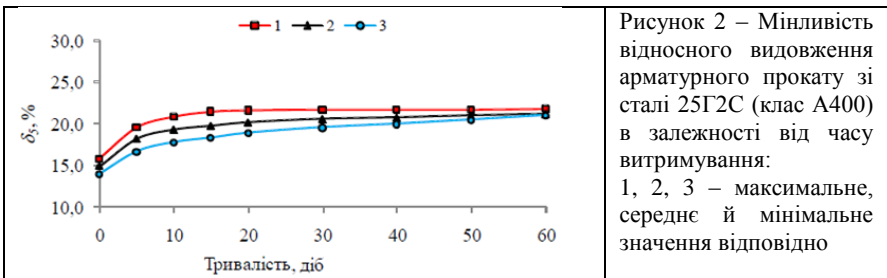


Рисунок 2 – Мінливість відносного видовження арматурного прокату зі сталі 25Г2С (клас А400) в залежності від часу витримування:
1, 2, 3 – максимальне, середнє й мінімальне значення відповідно

На рис. 3 наведена мінливість механічних властивостей термічно зміцненого арматурного прокату діаметром 12,0 мм зі сталі 25Г2С (клас А500).

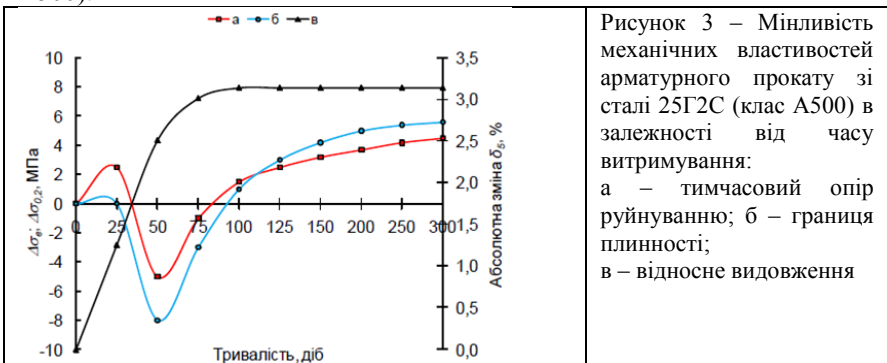


Рисунок 3 – Мінливість механічних властивостей арматурного прокату зі сталі 25Г2С (клас А500) в залежності від часу витримування:
а – тимчасовий опір руйнуванню; б – границя плинності;
в – відносне видовження

Усереднення отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки:

1) зміна тимчасового опору руйнуванню та границя плинності мають мінусове відхилення – 4...– 7 МПа й – 7...– 9 МПа відповідно, приблизно

на 50-ту добу спостерігається їх зростання, а в інтервалі 80...90 діб значення наближаються до рівня первинних випробувань із подальшим зростанням до 4...6 МПа й наступною стабілізацією; 2) відносне видовження за рахунок видалення водню й релаксації напружень зростає на ~2,5 % абс. і стабілізується в часі.

На рис. 4 наведено усереднену мінливість механічних властивостей термічно зміцненого арматурного прокату діаметром 12,0 мм зі сталі 25Г2С (клас А1000). Для збереження відповідної автентичності досліджень визначення механічних властивостей прокату проводили без застосування операції електронагріву. Аналіз графічних залежностей показав, що протягом часу арматурний прокат класу А1000 не схильний до знеміцнення. Після виділення водню й релаксації напружень, приблизно на 120-ту добу, тимчасовий опір руйнуванню приймає свої істинні значення, при цьому границя плинності спочатку характеризується зменшенням (мінусові відхилення), надалі протягом 90 діб значення $\sigma_{0,2}$ наближаються до результатів первинних випробувань, а приблизно на 120-ту добу стабілізуються у часі.

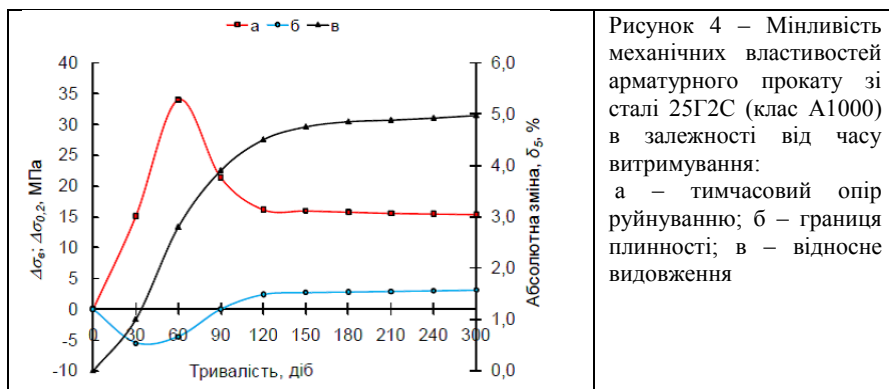


Рисунок 4 – Мінливість механічних властивостей арматурного прокату зі сталі 25Г2С (клас А1000) в залежності від часу витримування: а – тимчасовий опір руйнуванню; б – границя плинності; в – відносне видовження

Зміни мінімальних значень границі плинності по відношенню до результатів первинних випробувань для прокату класу А1000 за абсолютним показником виявляються меншими, ніж для арматурного прокату класу А500, що пов'язано скоріш за все з уповільненням виділення водню. Відносне видовження інтенсивно зростає (до 4,0...4,5 % абс.) протягом 90...120 діб, надалі стабілізується й практично не змінюється у часі. В разі отримання низьких значень δ_5 під час первинних випробувань, у подальшому абсолютна зміна відносного видовження є дуже істотною (до 5,0 %). Аналіз мінливості механічних

властивостей в часі як для гарячекатаного, так і термічно зміцненого арматурного прокату свідчить про наступне:

- арматурний прокат класу А400 має схильність до знеміцнення протягом часу, особливо істотно при цьому змінюється границя плинності; після досягнення мінімальних значень спостерігається одночасне зростання σ_6 та $\sigma_{0,2}$ з подальшою їх стабілізацією приблизно на одному постійному рівні;

- відносне видовження для прокату всіх класів міцності (А400, А500 та А1000) характеризується суттєвою зміною абсолютних значень і подальшою стабілізацією на певному рівні;

- динаміка збільшення δ_5 в перші 30 діб виявляється максимальною для гарячекатаного прокату, при цьому приріст абсолютних значень відносного видовження зменшується з підвищенням ступеню зміцнення арматурної сталі, що обумовлено зворотною водневою крихкістю;

- при підвищенні класу міцності арматурний прокат характеризується меншою схильністю до знеміцнення протягом часу. Для прокату класу міцності А500 поведінка границі плинності й тимчасового опору руйнуванню має схожий вигляд: обидва показники досягають мінімуму з мінусовим відхиленням, надалі значення σ_6 та $\sigma_{0,2}$ відповідають результатам первинних випробувань і несуттєво підвищуються; для арматурного прокату класу А1000 тимчасовий опір руйнуванню не має мінусового відхилення, а границя плинності характеризується незначним мінімумом, що пов'язано з менш повільним виділенням водню зі збільшенням ступеня зміцнення прокату;

- очевидно, що мінливість механічних властивостей арматурного прокату протягом часу залежить від параметрів структури та вмісту водню в сталі; виділення водню з арматурного прокату класів міцності А400...А500 обумовлює незначне його знеміцнення, на відміну від прокату класу А1000, при цьому абсолютна зміна відносного видовження для всіх класів міцності арматурного прокату характеризується істотним зростанням протягом часу.

На відміну від арматурних сталей при виробництві бунтового прокату з високовуглецевої сталі, окрім відносного видовження, нормується відносне звуження, тому представляло інтерес дослідити мінливість зазначених показників пластичності протягом часу після застосування прискореного охолодження (зі швидкістю 15...20 °С/с) на завершальній стадії деформаційно-термічної обробки. При дослідженні мінливості механічних властивостей бунтового прокату зі сталі С70D діаметром 6,5 мм встановлені наступні особливості (рис. 5):

- смуга мінливості тимчасового опору руйнуванню звужується протягом часу, якщо безпосередньо на день прокатки різниця між

максимальним та мінімальним значенням становить 37 МПа, то надалі вона монотонно зменшується й на 80-ту добу не перевищує 30 МПа;

- смуга мінливості границі плинності має аналогічну залежність, різниця між максимальним та мінімальним значенням на день прокатки становить 49 МПа, а на 80-ту добу не перевищує 40 МПа, при цьому обидва показники міцності сталі (σ_6 та $\sigma_{0,2}$) не мають мінусових відхилень по відношенню до результатів первинних випробувань;

- протягом часу тимчасовий опір руйнуванню та границя плинності мають тенденцію до незначного зростання: 18...26 МПа і 19...28 МПа відповідно у порівнянні з результатами первинних випробувань;

- мінливість відносного видовження й відносного звуження характеризується суттєвим збільшенням показників пластичності протягом 3 діб після первинних випробувань; у разі, якщо δ_{10} і ψ на день прокатки характеризуються мінімальними значеннями (9,6 % і 18 % відповідно), то протягом 3 діб вони зростають на $\sim 3,5$ % абс. і $\sim 9,0$ % абс. відповідно; з плином часу, за аналогією з показниками міцності, смуга мінливості δ_{10} і ψ має тенденцію до суттєвого звуження у порівнянні з результатами первинних випробувань.

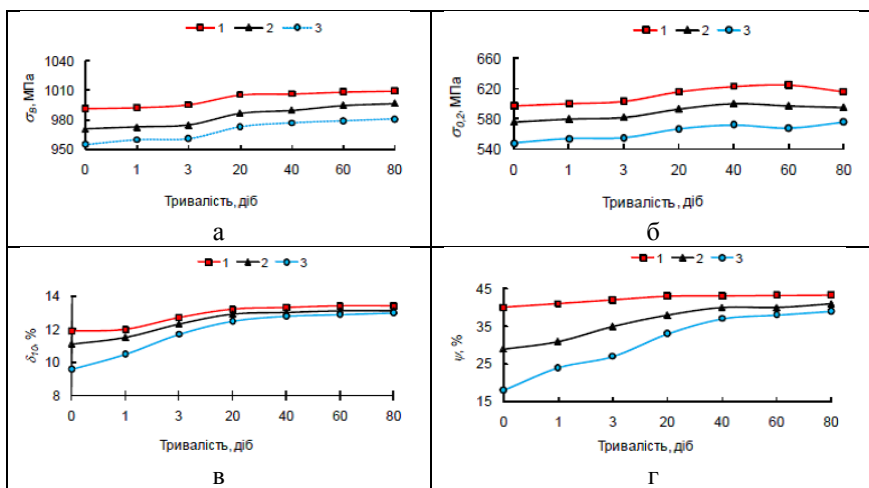
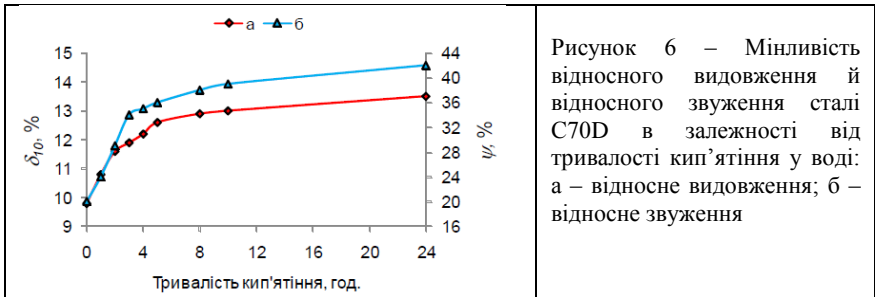


Рисунок 5 – Мінливість механічних властивостей бунтового прокату діаметром 6,5 мм зі сталі С70D: а – тимчасовий опір руйнуванню; б – границя плинності; в – відносне видовження; г – відносне звуження; 1, 2, 3 – максимальне, середнє й мінімальне значення відповідно

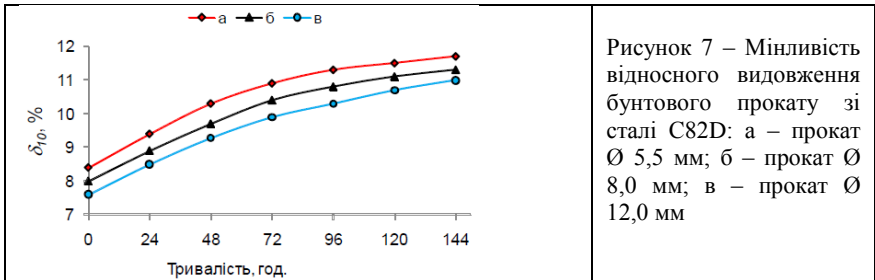
З метою додаткового дослідження впливу водню на мінливість показників пластичності зразки бунтового прокату зі сталі С70D

піддавали кип'ятінню у воді протягом 1...24 годин. Вплив тривалості кип'ятіння зразків на мінливість значень δ_{10} і ψ наведено на рис. 6.

Аналізуючи графічну залежність, стає очевидним, що на підвищення показників пластичності вирішальний вплив чинить водень, який окрихчує бунтовий прокат безпосередньо після завершення гарячої деформації з наступним прискореним охолодженням. Найбільш інтенсивне зростання δ_{10} і ψ відбувається протягом 4...5 годин кип'ятіння зразків, надалі показники пластичності стабілізуються на певному рівні та змінюються несуттєво (до ~ 1,0 % абс. і ~ 6,0 % абс. відповідно). При цьому показники міцності змінюються за аналогією з вищенаведеною графічною залежністю (рис. 5, а і рис. 5, б), зростання σ_s та $\sigma_{0,2}$ складає 32 МПа та 29 МПа відповідно.



На рис. 7 і рис. 8 наведено мінливість відносного видовження й відносного звуження бунтового прокату зі сталі С82D.



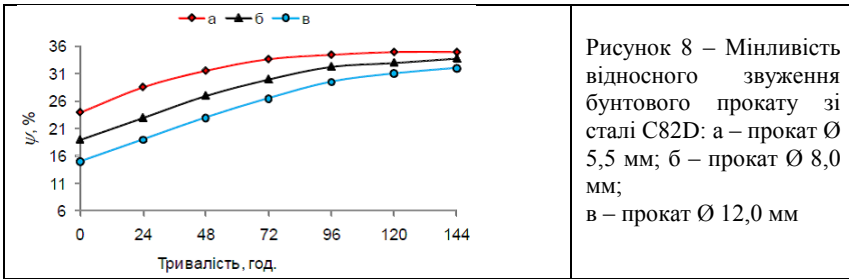


Рисунок 8 – Мінливість відносного звуження бунтового прокату зі сталі С82Д: а – прокат Ø 5,5 мм; б – прокат Ø 8,0 мм; в – прокат Ø 12,0 мм

Згідно з графічними залежностями, можливо відзначити наступні особливості:

- при первинних випробуваннях зразків сталі С82Д (безпосередньо після прокатки) фіксуються низькі значення відносного видовження та відносного звуження (7,6...8,4 % і 15...24 % відповідно), при цьому найбільш повною мірою така особливість є характерною для бунтового прокату більшого діаметру;

- після витримування бунтового прокату протягом 48...72 годин значення δ_{10} і ψ для всіх діаметрів прокату зростають до 30...34 % і стабілізуються у часі;

- подальше збільшення витримування прокату не приводить до суттєвої зміни значень δ_{10} і ψ ; така поведінка показників пластичності, встановлена при проведенні досліджень, зумовлена виділенням дифузійно-рухомого водню, при цьому максимальна інтенсивність зростання значень відбувається протягом 72 годин.

Різниця в початкових значеннях δ_{10} і ψ бунтового прокату зі сталі С82Д в залежності від діаметру додатково може бути пов'язана зі ступенем деформаційного опрацювання безперервнолітої заготовки та, відповідно, впливом ділянок залишків дендритної структури, які виявляються потенційними місцями блокування водню.

Висновки

1. За результатами досліджень встановлено, що гарячекатаний арматурний прокат має схильність до знеміцнення протягом часу, особливо істотно при цьому змінюється границя плинності. Після досягнення мінімальних значень спостерігається одночасне зростання показників міцності та їх стабілізація протягом часу. Зміни мінімальних значень границі плинності по відношенню до результатів первинних випробувань для прокату класу А1000 за абсолютним показником виявляються меншими, ніж для арматурного прокату класу А500, що пов'язано скоріш за все з уповільненням виділення водню.

2. Відносне видовження для прокату всіх класів міцності (A400, A500 і A1000) характеризується суттєвою зміною абсолютних значень і подальшою стабілізацією на певному рівні. Динаміка збільшення δ_5 в перші 30 діб виявляється максимальною для гарячекатаного прокату (клас A400), при цьому приріст абсолютних значень відносного видовження зменшується з підвищенням ступеню зміцнення арматурної сталі, що зумовлено зворотною водневою крихкістю. Відносне подовження інтенсивно зростає (до 4,0...4,5 % абс.) протягом 90...120 діб, надалі стабілізується й практично не змінюється в часі.

3. При підвищенні класу міцності арматурний прокат характеризується меншою схильністю до знеміцнення протягом часу. Для прокату класу A500 границя плинності й тимчасового опору руйнуванню спочатку досягають мінімуму з мінусовим відхиленням, далі наближаються до результатів первинних випробувань, несуттєво зростають і стабілізуються у часі.

4. Для арматурного прокату класу A1000 тимчасовий опір руйнуванню не має мінусового відхилення, а границя плинності характеризується незначним мінімумом, що пов'язано з менш повільним виділенням водню зі збільшенням ступеня термічного зміцнення прокату.

5. Мінливість механічних властивостей арматурного прокату протягом часу має безпосередній зв'язок із параметрами структури та початковим вмістом водню в сталі. Виділення водню з арматурного прокату класів A400...A500 обумовлює його незначне знеміцнення на відміну від прокату класу A1000. При цьому абсолютна зміна відносного видовження для всіх класів міцності арматурного прокату характеризується істотним зростанням протягом часу.

6. Смуга мінливості границі плинності та тимчасового опору руйнуванню бунтового прокату зі сталі С70D виявляється близькою до поведінки арматурної сталі класу A1000, але при цьому характеризується деякими особливостями. Якщо безпосередньо на день прокатки різниця між максимальним та мінімальним значеннями σ_g становить 37 МПа, то надалі вона монотонно зменшується і на 80-ту добу не перевищує 30 МПа. Смуга мінливості границі плинності має аналогічну залежність, різниця між максимальним та мінімальним значеннями на день прокатки становить 49 МПа, а на 80-ту добу не перевищує 40 МПа, при цьому обидва показники (σ_g і $\sigma_{0,2}$) не мають мінусових відхилень по відношенню до результатів первинних випробувань.

7. Мінливість відносного видовження й відносного звуження для прокату зі сталі С70D характеризується суттєвим збільшенням показників пластичності протягом 3 діб після первинних випробувань. У разі, якщо δ_{10} і ψ на день прокатки характеризуються мінімальними значеннями

(9,6 % і 18 % відповідно), то протягом 3 діб вони зростають на $\sim 3,5$ % абс. і $\sim 9,0$ % абс. відповідно. Протягом часу, за аналогією з показниками міцності, смуга мінливості δ_{10} і ψ має тенденцію до суттєвого зменшення у порівнянні з результатами первинних випробувань.

8. При кип'ятінні зразків прокату зі сталі С70D у воді протягом 1...24 годин встановлено, що на зростання δ_{10} і ψ вирішальний вплив чинить водень, який окрихчує бунтовий прокат безпосередньо після завершення гарячої деформації та наступного прискороного охолодження. Найбільш інтенсивне зростання δ_{10} і ψ відбувається протягом 4...5 годин, у подальшому показники пластичності стабілізуються на певному рівні та змінюються несуттєво (до 1,0 % абс. і $\sim 6,0$ % абс. відповідно). При цьому значення σ_6 і $\sigma_{0,2}$ змінюються за аналогією зі зміною показників міцності під час витримування прокату протягом тривалого часу.

9. За результатами дослідження мінливості механічних властивостей бунтового прокату зі сталі С82D встановлено, що при первинних випробуваннях зразків (безпосередньо після прокатки) фіксуються низькі значення відносного видовження та відносного звуження (7,6...8,4 % і 15...24 % відповідно), при цьому розвиток окрихчування має тенденцію до зростання зі збільшенням діаметру. Після витримування бунтового прокату протягом 48...72 годин значення δ_{10} і ψ для всіх діаметрів прокату зростають до 30...34 % і стабілізуються у часі.

10. Різниця в початкових значеннях δ_{10} і ψ бунтового прокату зі сталі С82D в залежності від діаметру додатково може бути пов'язана зі ступенем деформаційного опрацювання безперервнолітої заготовки та, відповідно, впливом ділянок залишків дендритної структури, які виявляються потенційними місцями блокування водню.

Перелік посилань

1. Гуляев А. П. *Металловедение* : учеб. для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. Москва : *Металлургия*, 1986. 544 с.
2. *Соколовский П. И.* Арматурные стали. Москва : *Металлургия*, 1964. 208 с.
3. *Барадынцева Е. П., Глазунова Н. А., Стефанович С. В., Роговцова О. В.* Влияние водорода на пластические свойства арматурного проката / *Литье и металлургия*. 2013. № 3 (72). С. 179–183.
4. *Высокопрочная арматурная сталь* / Кугушин А. А. и др. Москва : *Металлургия*, 1986. 272 с.
5. *Кудрин В. А.* Теория и технология производства стали : учеб. для вузов. Москва : Мир, ООО «Изд-во АСТ», 2003. 528 с.
6. *Касаткин Г. Н.* Водород в конструкционных сталях. Москва : *Интернет Инжиниринг*, 2003. 336 с.
7. *Гуляев А. П., Ильченко М. М.* Исследование и совершенствование технологии производства арматурной стали 23Х2Г2Т. *Сталь*. 1977. № 8. С. 751–753.
Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. – Випуск 34 «*Fundamentalnye i prikladnye problemy chornoj metallurgii*». – 2020. – Випуск 34 «*Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*». – 2020. – Collection 34

8. Способ изготовления стальных кольцевых изделий : А.С. СССР № 1102816 / Шаповалов В. И., Антипова Н. В., Трофименко В. В. и др. Б.И. № 26, 1984.
9. Водородное охрупчивание высокопрочной низкоуглеродистой кремнемарганцовистой арматурной стали / Черненко В. Т. и др. // *Сталь*. 1988. № 6. С. 85–89.
10. Способ производства высокопрочной стержневой арматуры : А.С. СССР № 1335573 / Сидоренко О. Г., Бабич В. К., Федорова И. П. и др. Б.И. № 33, 1987.
11. *Тупилко В. М., Сапиро В. С., Терещенко В. Т., Алферов К. С.* Влияние водорода на пластические свойства высокопрочной арматурной стали 80С / МиТОМ. 1971. № 2. С. 64–65.
12. Тупилко В. М., Заика В. И., Швед М. М., Тупилко Т. В. Роль водорода в охрупчивании арматурной стали 35ГС, термически упрочненной с прокатного нагрева / *ФХММ*. № 4. 1974. С. 47–50.
13. Технология термической обработки арматурного и фасонного проката в потоке сортовых станов (Теория и металлургическая практика) : монография / Сычков А. Б. и др. Germany-Mauritius : Palamarium Academic Publishing, 2017. 261 с.
14. Влияние водорода на механические свойства готового проката / Смияненко И. Н. и др. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 3–4. С. 147–151.
15. *Сычков А. Б.* Совершенствование технологии производства арматурного проката в бунтах. *Сталь*. 1995. № 2. С.37–39.
16. *Сычков А. Б., Жигарев М. А., Перчаткин А. В.* Термомеханически упрочненный прокат производства Молдавского металлургического завода для преднапряженного армирования бетона : Сб. научных трудов Международной конференции по бетону и железобетону. Т. 5. Железобетон в транспортном строительстве. Экология. Аспекты применения бетона и железобетона. Арматура и сварка. Москва : Дипол, 2005. С. 501–509.
17. Термомеханическая обработка проката из непрерывнолитой заготовки малого сечения / В. В. Парусов и др. Запорожье : ЗГУ, 2000. 142 с.
18. *Заика В. И., Кащенко Ю. А., Брехаря Г. П.* Водород в промышленных сталях. Запорожье : ЗГУ, 1998. 192 с.
19. *Сычков А. Б., Богданов Н. А., Ласков В. П., Суханов А. И.* Совершенствование процесса термоупрочнения арматурного проката / *Сталь*. 1992. № 5. С. 65–69.
20. *Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В.* Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. Днепрпетровск : Арт-пресс, 2012. 376 с.

Reference

1. Gulyaev A. P. (1986). *Metallovedenie: ucheb. dlya vuzov [Metal science: textbook for universities]*. (6-e izd. pererab. i dop). Moskva: Metallurgiya, 1986, 544. [In Russian].
2. Sokolovskij P. I. (1964). *Armturnye stali [Reinforcing steel]*. Moskva: Metallurgiya, 1964, 208. [In Russian].

3. Baradynceva E. P., Glazunova N. A., Stefanovich S. V. & Rogovcova O.V. (2013). Vliyanie vodoroda na plasticheskie svoystva armaturnogo prokata [Influence of hydrogen on plastic properties of reinforcing bar]. *Lite i metallurgiya [Casting and metallurgy]*, 2013, 3 (72), 179-183. [In Russian].
4. Kugushin A. A., Uzlov I. G., Kalmykov V.V., Madatyan S. A. & Ivchenko A. V. (1986). *Vysokoprochnaya armaturnaya stal [High-strength reinforcing steel]*. Moskva: Metallurgiya, 1986, 272. [In Russian].
5. Kudrin V. A. (2003). *Teoriya i tehnologiya proizvodstva stali: ucheb. dlya vuzov [Theory and technology of steel production: textbook for universities]*. Moskva: Mir, OOO «Izd-vo AST», 2003, 528. [In Russian].
6. Kasatkin G. N. (2003). Vodorod v konstruktsionnykh stalyah [*Hydrogen in structural steels*]. Moskva: Internet Inzhiniring, 2003, 336. [In Russian].
7. Gulyaev A. P. & Ilchenko M. M. (1977). Issledovanie i sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva armaturnoj stali 23H2G2T [Research and improvement of production technology of reinforcing steel 23H2G2T]. *Stal [Steel]*, 1977, 8, 751–753. [In Russian].
8. Shapovalov V. I., Antipova N. V. & Trofimenko V. V. et al. (1984). Sposob izgotovleniya stalnykh kolcevykh izdelij [Method of manufacturing steel ring products]. *A.S. SSSR № 1102816*, 1984, 26. [In Russian].
9. Chernenko Ye. T., Sidorenko O. G., Fedorova I. P., Mironov V. A. & Demchenko Ye. M. (1988). Vodorodnoe ohrupchivanie vysokoprochnoj nizkouglerodistoj kremnemargancovistoj armaturnoj stali [Hydrogen embrittlement of high-strength low-carbon silicon-manganese reinforcing steel]. *Stal [Steel]*, 1988, 6, 85–89. [In Russian].
10. Sidorenko O. G., Babich V. K. & Fedorova I. P. et al. (1987). Sposob proizvodstva vysokoprochnoj sterzhnevoj armatury [Method for the production of high-strength bar reinforcement]. *A.S. SSSR № 1335573*, 1987, 33. [In Russian].
11. Tupilko V. M., Sapiro V. S., Tereshenko V. T. & Alferov K. S. (1971). Vliyanie vodoroda na plasticheskie svoystva vysokoprochnoj armaturnoj stali 80S [Influence of hydrogen on plastic properties of high-strength reinforcing steel 80C] / *MiTOM [Metal Science and Heat Treatment]*, 1971, 2, 64-65. [In Russian].
12. Tupilko V. M., Zaika V. I., Shved M. M. & Tupilko T. V. (1974). Rol vodoroda v ohrupchivanii armaturnoj stali 35GS, termicheski uprochnennoj s prokatnogo nagreva [Role of hydrogen in embrittlement of reinforcing steel 35GS thermally hardened from rolling heating]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov [Physicochemical mechanics of materials]*, 1974, 4, 47-50. [In Russian].
13. Sychkov A. B., Parusov E. V., Moller A. B., Tulupov O. N., Sheksheyev M. A., & Stolyarov A. YU. et al. (2017). *Tehnologiya termicheskoy obrabotki armaturnogo i fasonnogo prokata v potoke sortovykh stanov (Teoriya i metallurgicheskaya praktika): monografiya [Technology of heat treatment of reinforcing and structural shapes in the flow of long-section mills (Theory and metallurgical practice): monograph]*. Germany-Mauritius : Palamarium Academic Publishing, 2017, 261. [In Russian].
14. Smiyanenko I. N., Babenko, M. A., Shchur V. A., Gunkin I. A., & Kostenko YU. D. (2004). Vliyanie vodoroda na mehanicheskie svoystva gotovogo prokata [Influence of

- hydrogen on mechanical properties of finished rolling]. *Teoriya i praktika metallurgii [Theory and practice of metallurgy]*, 2004, 3-4, 147-151. [In Russian].
15. Sychkov A. B. (1995). Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva armaturnogo prokata v buntah [Improvement of the technology of production of reinforcing bars in bundles]. *Stal [Steel]*, 1995, 2, 37-39. [In Russian].
 16. Sychkov A. B., Zhigarev M. A. & Perchatkin A. V. (2005). Termomechanicheski uprochnennyj prokat proizvodstva Moldavskogo metallurgicheskogo zavoda dlya prednapryazhennogo armirovaniya betona [Thermomechanical hardened rolled products of the Moldavian metallurgical plant for prestressed concrete reinforcement]. *Sb. nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj konferencii po betonu i zhelezobetonu. T. 5. Zhelezobeton v transportnom stroitelstve. Ekologiya. Aspekty primeneniya betona i zhelezobetona. Armatura i svarka. [Collection of scientific papers of the International Conference on Concrete and Reinforced Concrete. Vol. 5. Reinforced concrete in transport construction. Ecology. Aspects of the use of concrete and reinforced concrete. Fittings and welding]*. Moskva: Dipol, 2005, 501–509. [In Russian].
 17. Parusov V. V., Belitchenko A. K., Bogdanov N. A., Sychkov A.B., Nesterenko A.M. & Parusov O. V. (2000). *Termomechanicheskaya obrabotka prokata iz nepreryvnolitoj zagotovki malogo secheniya [Thermomechanical treatment of rolled products from continuously cast billets of small section]*. Zaporozhie: ZGU, 2000, 142. [In Russian].
 18. Zaika V. I., Kashenko Yu. A. & Breharya G. P. (1998). Vodorod v promyshlennyh stalyah [Hydrogen in industrial steels]. Zaporozhie: ZGU, 1998, 192. [In Russian].
 19. Sychkov A. B., Bogdanov N. A., Laskov V. P. & Suhanov A. I. (1992). Sovershenstvovanie processa termouprochneniya armaturnogo prokata [Improvement of the thermo-hardening process of reinforcing bar]. *Stal [Steel]*, 1992, 5, 65-69. [In Russian].
 20. Parusov V. V., Sychkov A. B. & Parusov E. V. (2012). *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy proizvodstva vysokoeffektivnyh vidov katanki [Theoretical and technological foundations for the production of highly efficient types of wire rod]*. Dnepropetrovsk : Art-press, 2012, 376. [In Russian].

E.V. Parusov, Ph.D., Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0002-4560-2043

I.N. Chuiko, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4753-614X

V.A. Lutsenko, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher Scientist, Lead researcher, ORCID 0000-0002-4604-5592

O.V. Parusov, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9879-6179

T.N. Golubenko, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-3583-211X

O.V. Lutsenko, Ph.D., Researcher, ORCID 0000-0001-8298-5306

A.I. Sivak, Researcher, ORCID 0000-0001-6948-7732

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Influence of thermal strengthening technology on variability of mechanical properties of rolled metal product

Summary. Rebars and coiled bar have a tendency to softening over time. After holding at the room temperature the ductility of the rolled products can be partially restored due to the processes of return and relaxation and also deposition of the diffusion-movable hydrogen from the steel. The reverse hydrogen brittleness and ageing are often observed, during production of the thermally strengthening rolled products. The variability of the mechanical properties of rebars and coiled bar of 25G2S, C70D and C82D steels with different diameters has been studied. It has been shown that tendency to softening is decreases during increasing of the strength class of the rebars (steel 25G2S) and it is related to deposition of the hydrogen in different quantities. Dynamics of increase of specific elongation for rebars turns out to be maximum in the first 30 days and growing rapidly (till 4,0...4,5 % abs.) over 90...120 days, then stabilizes and practically does not change over time. After use of the accelerated cooling at the final stage of the deformation heat treatment of the coiled bar of C70D high carbon steel the variability of specific elongation and reduction of area are characterized by a significant increase of ductility indexes within 3 days after primary testing. By research of variability of mechanical properties of coiled bar of C82D steel was established that during initial testing of samples (immediately after rolling) were recorded a low values of specific elongation and reduction of area (7,6...8,4 % and 15...24 % respectively) and while the progress of embrittlement have a tends to growth with increasing diameter. After holding of the coiled bar within 48...72 hours the parameters of the ductility for all diameters of rolled products are grow to 30...34% and stabilize over time. It has been shown that variability of the mechanical properties have a direct relations with the parameters of the structure, the initial hydrogen content in the steel and with degree of deformation processing of blank continuous casting.

Keywords: rebars, coiled bar, hardness class, mechanical properties, yield strength, specific elongation

For citation: *Parusov E.V., Chuyko I.M., Lutsenko V.A., Parusov O.V., Holubenko T.M., Lutsenko O.V., Sivak H.I. Vplyv tekhnolohiyi termichnoho zmitsnennya na minlyvist' mekhanichnykh vlastyvostry metaloprokatu. [Influence of thermal hardening technology on the variability of mechanical properties of rolled metal.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 202-218. [in Ukrainian]. DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-202-218*

Стаття надійшла до редакції збірника 30.10.20 року, пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування (Протокол засідання редакційної колегії збірника №3 від 22 грудня 2020 року)