

УДК: 621.771.2:621.785:669.14

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.010721.55.782

ПРО ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ ЗІ СТАЛЕЙ ПЕРЛІТНОГО КЛАСУ

ПАРУСОВ Е. В.^{1*}, *докт. техн. наук, ст. наук. співроб.*,ГУБЕНКО С. І.², *докт. техн. наук, проф.*,ЧУЙКО І. М.³, *канд. техн. наук*,ПАРУСОВ О. В.⁴, *канд. техн. наук, ст. наук. співроб.*

^{1*} Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

² Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ferrosplav@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

⁴ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: termet@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

Анотація. Постановка проблеми. Під час виготовлення бунтового прокату зі сталей перлітного класу металургійні підприємства стикаються з вимушеним відсортуванням деяких партій безперервнолітої заготовки або товарної продукції через невідповідність нормативним вимогам. Одним з альтернативних шляхів використання таких заготовок може бути їх перепризначення під виробництво термічно зміцненого арматурного прокату. Відповідно до редакції ГОСТ 5781-82 була передбачена можливість виробництва гарячекатаного арматурного прокату зі сталі марки 80С (вміст вуглецю 0,74...0,82 %), а за ТУ 14-15-339-94 – термічнозміцненого, із вмістом вуглецю 0,50...0,85 % С. У світовій практиці арматурний прокат із класом міцності, аналогічним класу А800...А1000 (ДСТУ 3760:2019), виробляється переважно з високовуглецевих сталей. Основним видом напруженої арматури у країнах ЄС, США, Канади і Великобританії є стрижні номінальним діаметром 26...40 мм класу міцності 835...1030 МПа та 26...36 мм класу міцності 1080...1230 МПа. Аналіз вимог, які пред'являють до арматурного прокату за різними нормативними документами, свідчить, що у стандартах Канади, США і Великобританії вміст вуглецю не нормується, а за стандартами Японії та України складає 0,45...0,80 % і 0,13...0,37 % відповідно. Згідно з вимогами міжнародних стандартів мінімальні значення границь плинності та міцності відповідають арматурному прокату А800 (ДСТУ 3760:2019). Отже, для можливості виготовлення арматурного прокату з високовуглецевих сталей необхідно визначити раціональні температурно-часові умови режимів термічного зміцнення, які забезпечать відповідність металопродукції вимогам ДСТУ 3760:2019. **Мета** – визначити вплив параметрів технології термічного зміцнення на особливості формування структури й механічні властивості арматурного прокату зі сталей із вмістом вуглецю 0,50...0,90 %. **Результати.** Науково доведено можливість виготовлення арматурного прокату класів міцності А800 і А1000 зі сталей C56D^B, C70D^B, C80D^B та C82D^B (EN 16120-2:2017) із використанням способів переривчастого і перерваного гартування. Відповідно до одержаних результатів промислове виготовлення арматурного прокату класів міцності А800 і А1000 із зазначених сталей сприятиме поліпшенню техніко-економічних показників під час виробництва бунтового прокату зі сталей перлітного класу, призначеного для виготовлення високоміцних металовиробів (холоднодеформована арматура, металокорд, бортовий дріт, пружинний дріт, арматурні канати тощо). За результатами промислових експериментів розроблено та затверджено технічну угоду на виробництво дослідних партій термічно зміцненого арматурного прокату класів міцності А800 і А1000 зі сталей, які містять 0,50...0,90 % вуглецю.

Ключові слова: арматурний прокат; термічне зміцнення; структура; механічні властивості; сталі перлітного класу

ABOUT TECHNOLOGICAL FEATURES OF PRODUCTION OF REINFORCING BARS FROM PEARLITE GRADE STEELS

PARUSOV E.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,GUBENKO S.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,CHUIKO I.M.³, *Ph. D.*,

PARUSOV O.V.⁴, *Ph. D., Sen. Res.*

^{1*} Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Acad. Starodubov, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

² National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

³ Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Acad. Starodubov, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ferrosplav@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

⁴ Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Sq. Acad. Starodubov, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: termet@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9879-6179

Abstract. Formulation of the problem. In the production of coiled rolled products from perlite grade steels, metallurgical enterprises encounter with the sorting of some batches of continuously cast billets or commercial products due to non-compliance with regulatory requirements. One of the alternative ways of using such blanks can be their reassignment for the production of thermally hardened reinforcing bars. In accordance with the edition of GOST 5781-82, it was possible to produce hot rolled reinforcing bars from steel grade 80C (carbon content 0,74...0,82 %), and according to TU 14-15-339-94 – thermally hardened with a carbon content of 0,50...0,85 % C. In world practice, reinforcing bars of a strength class similar to classes A800...A1000 (DSTU 3760:2019) are made mainly of high-carbon steels. The main type of stressed reinforcement in the EU, USA, Canada and Great Britain are rods with a nominal diameter of 26...40 mm of strength class 835...1030 MPa and 26...36 mm of strength class 1080...1230 MPa. An analysis of the requirements for reinforcing bars according to various regulatory documents shows that in the standards of Canada, the USA and the UK, the carbon content is not standardized, but according to the standards of Japan and Ukraine it is 0,45...0,80 % and 0,13...0,37 % respectively. According to the requirements of international standards, the minimum values of the yield strength and strength correspond to the reinforcing bar A800 (DSTU 3760:2019). Therefore, for the possibility of producing reinforcing bars from high-carbon steels, it is necessary to establish rational temperature-time conditions for heat hardening modes, which will ensure that the finished metal products comply with the requirements of DSTU 3760:2019. **Purpose.** Determine the influence of the parameters of the technology of thermal hardening on the features of the formation of the structure and mechanical properties of reinforcing bars made of steels with a carbon content of 0,50...0,90 %. **Results.** The possibility of producing reinforcing bars of strength classes A800 and A1000 from steels C56D^B, C70D^B, C80D^B and C82D^B (EN 16120-2:2017) using intermittent and interrupted quenching methods has been scientifically proven. In accordance with the results obtained, the industrial production of reinforcing bars of strength classes A800 and A1000 from these steels is expedient, since it will contribute to the improvement of technical and economic indicators in the production of coiled steel from perlite grade steels intended for high-strength products (cold-worked rebar, metal cord, bead wire, spring wire, reinforcing ropes, etc.). Based on the results of industrial experiments, a technical agreement was developed and approved for the production of pilot batches of thermally hardened reinforcing bars of strength classes A800 and A1000 from steels containing 0.50...0.90 % carbon.

Keywords: *reinforcing bars; thermal hardening; structure; mechanical properties; pearlite grade steels*

Вступ та постановка проблеми. Виробництво високоміцних металовиробів для попередньо напружених будівельних конструкцій – складна науково-технічна проблема, яка потребує постійного пошуку нових методів ефективного впливу на структуру та властивості гарячекатаної сталі (бунтового прокату), а також способів її оброблення [1–4]. Мета таких заходів – досягнення високого рівня властивостей товарної продукції та підвищення техніко-економічних показників виробничого процесу [5].

На ринку конструкційних сталей наразі спостерігається суттєвий попит на бунтовий прокат зі сталей перлітного класу, який у подальшому піддають холодному

пластичному деформуванню енергозберігальним способом прямого волочіння. Надалі переробну заготовку піддають механотермічній обробці і використовують як металеві елементи будівельних конструкцій високої міцності (холоднодеформована арматура, сталеві арматурні канати тощо) [6; 7].

Комплекс механічних властивостей бунтового прокату – це структурно чутливий показник, а головна проблема під час його виробництва полягає у підвищеному вмісті неметалевих включень (НВ) в сталі, що неможливо виправити жодною з відомих термічних обробок. У разі перевищення нормативних вимог за вмістом НВ у сталі, які є концентраторами

напружень і джерелами утворення тріщин під час холодного деформування, металургійні підприємства вимушені відсортовувати такі партії прокату, що спричинює неможливість його застосування за відповідним призначенням.

Очевидно, що виробництво прокату зі значним відхиленням за вмістом НВ можливо попередити вже на етапі одержання безперервнолітої заготовки (БЛЗ). Методологічний підхід до ідентифікації НВ у БЛЗ та прогнозування їх середніх розмірів у прокаті детально розглянуто у роботі [8].

У разі перевищення вмісту НВ від нормативних вимог постає питання: на виробництво якого сортаменту металопродукції можливо перепризначити такі партії БЛЗ? Беручи до уваги, що вміст НВ не унормовано стандартом ДСТУ 3760:2019 для арматурного прокату, необхідно дослідити можливість отримання високоміцних арматурних сталей з партій БЛЗ із зазначеним відхиленням за показниками якості. Згідно з раніше проведеними дослідженнями встановлено найбільш сприятливі параметри режимів термічного зміцнення арматурного прокату зі сталі 28С, які дозволяють гарантовано досягати класів міцності А800 і А1000 [8].

Відповідно до редакції ГОСТ 5781-82 була передбачена можливість виробництва гарячекатаного арматурного прокату зі сталі марки 80С (вміст вуглецю 0,74...0,82 %), а за ТУ 14-15-339-94 – термічнозміцненого із вмістом вуглецю 0,50...0,85 %. У світовій практиці арматурний прокат із класом міцності, аналогічним класу А800...А1000 за ДСТУ 3760:2019, виготовляють переважно з високовуглецевих сталей. Основний вид напруженої арматури у країнах ЄС, США, Канади і Великобританії – це стрижні номінальним діаметром 26...40 мм (клас міцності 835...1030 МПа) і 26...36 мм (клас міцності 1080...1230 МПа).

Аналіз вимог, які пред'являються до арматурного прокату за різними стандартами (EN 10138-1, JIS G 3109, CSA 6279, ASTM A722, BS-4486, ДСТУ 3760:2019), показав, що, наприклад, у

стандартах Канади, США і Великобританії вміст вуглецю не нормується, а за стандартами Японії та України він складає 0,45...0,80 % і 0,13...0,37 % С відповідно.

За вимогами міжнародних стандартів нормування мінімальних значень механічних властивостей для напруженої арматури обмежується такими показниками: $\sigma_{0,2} \geq 835$ МПа, $\sigma_e \geq 1030$ МПа, що відповідає арматурній сталі класу міцності А800 за ДСТУ 3760:2006. Логічно припустити, що під час термічного зміцнення арматурного прокату зовнішні та внутрішні шари металу з високовуглецевою сталі повинні зазнавати фазових перетворень, що характерні для низьковуглецевих легованих сталей, традиційно використовуваних у металургійній практиці. Очевидно, що виготовлення арматурного прокату зі сталей, які характеризуються більш високим вмістом вуглецю, може викликати зменшення показників пластичності, ударної в'язкості, а також релаксаційної стійкості [9–11].

Результати математичного моделювання дозволили встановити, що виробництво арматурного прокату класів міцності А800 і А1000 зі сталей, які містять 0,55...0,88 % С, цілком можливе [12; 13]. Незважаючи на наявні дослідження щодо впливу технології виплавлення, позапічного оброблення, розливання та особливостей деформаційно-термічного впливу на високовуглецеві сталі й, відповідно, формування комплексу показників їх якості [14–16], низка питань теоретичного і, особливо, технологічного характеру залишаються недостатньо вивченими [7; 8; 17–20].

Отже, існує науковий і практичний інтерес виготовити дослідні партії високоміцного арматурного прокату зі сталей перлітного класу, а також визначити вплив режимів термічного зміцнення й зміни вмісту вуглецю на формування структури і властивостей одержаних металовиробів.

Мета роботи – визначення впливу параметрів технології термічного зміцнення на особливості формування структури і

механічні властивості арматурного прокату зі сталей із вмістом вуглецю 0,50...0,90 %.

Матеріал і методика дослідження. Як вихідний матеріал використано БЛЗ перерізом 125 мм × 125 мм зі сталей С56D^В, С70D^В, С80D^В і С82D^В (табл. 1). Нагрівання БЛЗ проводили в печі з крокуючим подом до температур 1180...1220 °С, потім їх піддавали прокатуванню на дрібносоротно-дротовому стані 320/150 з подальшим охолодженням на лінії термічного зміцнення (рис. 1). Охолодження арматурного прокату проводилося за двома технологічними

режимами (табл. 2) № А (переривчасте гартування) і № Б (перерване гартування) з варіюванням швидкості прокатування (11...14 м/с) та температур на холодильнику (630...400 °С). Використане обладнання: оптичний мікроскоп «Ахiovert M200 Mat», універсальна випробувальна машина «ТТDM Instron». Механічні властивості визначали за ГОСТ 1497-84. Як базові умови для оцінювання комплексу механічних властивостей дослідних партій арматурного прокату обрано вимоги стандарту ДСТУ 3760:2019.

Таблиця 1

Хімічний склад сталей для виробництва дослідних партій термічно зміцненого арматурного прокату

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % ваг. (EN 16120-2:2017)									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N	B
С56D ^В	0,57	0,56	0,19	0,011	0,004	0,04	0,07	0,17	0,009	0,0021
С70D ^В	0,71	0,52	0,19	0,010	0,003	0,08	0,05	0,14	0,007	0,0017
С80D ^В	0,80	0,56	0,16	0,008	0,003	0,06	0,04	0,12	0,007	0,0018
С82D ^В	0,88	0,54	0,15	0,010	0,003	0,05	0,06	0,09	0,008	0,0022

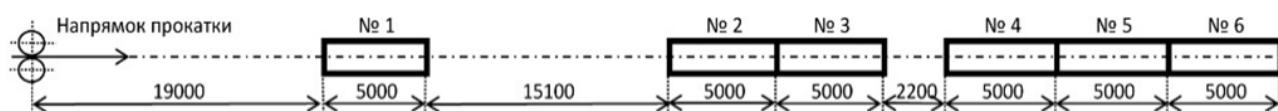


Рис. 1. Схема розташування секцій траси водяного охолодження на сортовій лінії прокатного стану 320/150

Таблиця 2

Режими роботи секцій водяного охолодження під час термічного зміцнення арматурного прокату

№ режиму	Секція охолодження					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
А	+	+	–	+	–	+
Б	–	–	–	+	+	+

Примітка: «+» – секція задіяна; «–» – секція не задіяна

Результати дослідження та їх обговорення. Під час досліджень змінювали такі технологічні параметри: тривалість післядеформаційної паузи (завершення гарячого деформування → початок водяного охолодження); час вирівнювання температур після інтенсивного водяного охолодження; загальний час та швидкість охолодження; кількість циклів охолодження. Промислові експерименти проведені при виробництві арматурного прокату номінальним діаметром 10...20 мм зі сталей, які містили 0,57...0,88 % С. Результати механічних випробувань арматурного прокату різних профілів наведено в табл. 3.

Показники пластичності прокату зі сталей С56D^В...С82D^В, так само, як і для сталі 28С [9], в низці випадків безпосередньо після гарячого прокатування й термічного зміцнення не відповідали вимогам ДСТУ 3760:2019, але після витримування на спокійному повітрі досягали нормативних значень. У деяких випадках при досягненні критичних температур (перерване гартування) арматурний прокат крихко руйнувався на рольгангу, не встигаючи дійти до холодильника. Під час термічного зміцнення прокату зі сталі С80D^В за температур самовідпуску 370...400 °С жоден стрижень профілю № 12 не дійшов до холодильника.

Окремі стрижні прокату, які досягали холодильника, руйнувалися вже при незначних вигинах, що зумовлено утворенням великої кількості поверхневих тріщин. У разі задіяння інтенсивних режимів водяного охолодження об'єктивно визначити механічні властивості арматурного прокату було неможливо (руйнування зразків у пружній області). Така особливість була характерною головним чином для прокату, виготовленого за режимом № Б зі сталей C80D^B і C82D^B профілі № 12 і № 14, що пов'язано зі зростанням рівня внутрішніх напружень під час гартування поверхневих шарів металу з більш високим умістом вуглецю.

Залежно від режиму термічного зміцнення структура арматурного прокату характеризується такими структурними складовими: 1) переривчасте гартування – сорбіт або троостит відпуску в поверхневій зоні, продукти проміжного розпаду в перехідному шарі та сорбіт або троостит у серцевині (рис. 2); 2) перерване гартування – високовідпущений мартенсит або троостит

відпуску в поверхневій зоні, троостит у серцевині (рис. 3).

При цьому зі зменшенням вмісту вуглецю (сталі C56D^B і C72D^B) в структурі перехідного шару прокату (режим № А) спостерігається виділення структурно-вільного фериту по границях зерен (рис. 4).

Слід зазначити, що структура термічно зміцненого арматурного прокату зі сталі 28С класів міцності А800 і А1000 аналогічна відносно досліджених сталей, окрім структури серцевини, яка містить тільки троостит [9]. Це свідчить про те, що для одержання арматурного прокату класів міцності А800 і А1000 зі сталей C56D^B...C82D^B його не потрібно охолоджувати з такою ж самою інтенсивністю, як сталь 28С.

З точки зору формування рівномірного розподілу структурних складових за поперечним перерізом арматурного прокату й, відповідно, рівня внутрішніх напружень найбільш сприятливою технологією термічного зміцнення перлітних сталей на класи міцності А800 і А1000 слід визнати режим № А (переривчасте гартування).

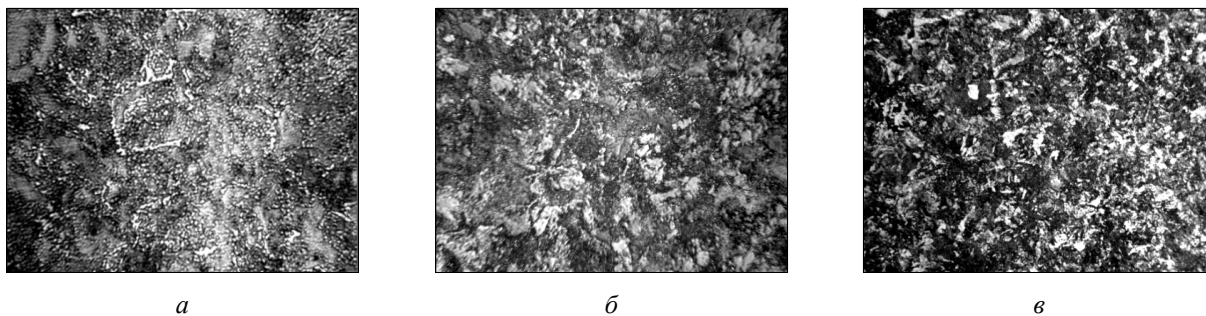
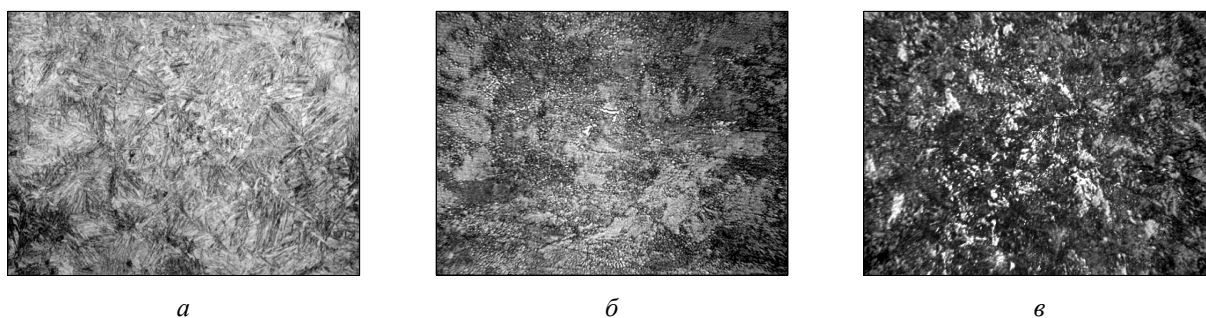
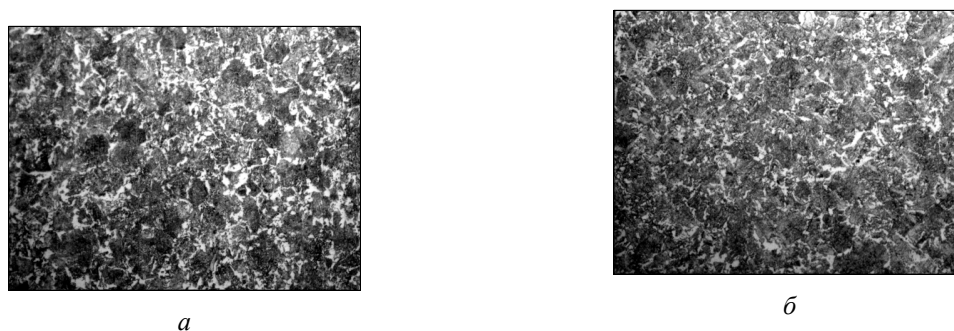
Таблиця 3

Механічні властивості термічно зміцненого арматурного прокату

Ø, мм	t _г , °С	Механічні властивості				
		σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	σ _{0,02} ÷ σ _{0,2}	δ ₅ , %	δ _p , %
1	2	3	4	5	6	7
сталь C56D^B						
14	400	1184	1039	0,82	14,0	2,6
20	400	1135	902	0,82	7,0	5,0
	420	1064	872	0,88	5,6	4,8
	490	1054	837	0,89	6,1	5,0
	570	972	739	0,93	5,2	5,6
сталь C70D^B						
10	400	1275	1099	0,96	14,6	4,4
	420	1158	956	0,98	14,4	4,4
	440	1065	820	0,99	16,0	6,6
12	400	1196	1019	0,93	13,5	3,8
	450	1031	791	0,79	15,3	6,6
14	420	1149	951	0,98	12,9	5,0
16	410	1141	954	0,96	11,5	4,0
	420	1054	841	0,97	13,5	6,0
20	400	1114	859	0,86	5,6	4,6
	410	1116	872	0,86	7,4	4,8
сталь C80D^B						
12	450	1350	1150	0,86	5,9	2,2
16	490	1147	877	0,98	10,1	6,8
	590	1139	867	0,98	11,4	6,2

Закінчення таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7
сталь С82D^В						
14	600	1195	900	0,99	11,4	7,0
	630	1169	868	0,99	11,9	6,6
	650	1120	813	0,99	11,7	7,6
16	410	1147	1040	0,93	1,9	0,4
	460	1184	903	0,96	6,3	4,0
	570	1192	892	0,98	10,0	7,0
	620	1170	879	0,97	5,0	3,0

Примітка: t_x – температура арматурного прокату на холодильнику, °С.Рис. 2. Характерна структура ($\times 500$) термічно зміцненого прокату способом переривчастого гартування: а – поверхня; б – перехідний шар; в – серцевинаРис. 3. Характерна структура ($\times 500$) термічно зміцненого прокату способом перерваного гартування: а, б – поверхня; в – серцевинаРис. 4. Структура ($\times 500$) перехідного шару термічно зміцненого прокату способом переривчастого гартування

Установлено особливості формування структури способами переривчастого і перерваного гартування, при цьому результати добре збігаються з промисловими експериментами під час термічного зміцнення арматурного прокату

зі сталей 28С і 20Г2С на класи міцності А800 і А1000 [9; 21].

Очевидно, що з метою раціонального визначення параметрів режиму термічного зміцнення арматурного прокату з різним вмістом вуглецю і швидкостями горячого

прокатування слід обґрунтовано підходити до розташування секцій водяного охолодження, кількості стадій охолодження, тривалості післядеформаційної паузи, інтенсивності охолодження й, відповідно, температур самовідпуску, що у підсумку забезпечить одержання ефективної структури арматурного прокату із досягненням заданого класу міцності.

Результати промислових експериментів дозволяють стверджувати, що термічно зміцнений арматурний прокат способами переривчастого та перерваного гартування зі сталей C56D^B...C82D^B у цілому відповідає вимогам, які унормовані до класів міцності A800 і A1000 стандартом ДСТУ 3760:2019.

Отже, виробництво арматурного прокату класів міцності A800 і A1000 зі сталей перлітного класу, які містять 0,57...0,88 % C; 0,52...0,56 % Mn; 0,15...0,19 % Si можливе і доцільне, оскільки сприятиме поліпшенню техніко-економічних показників виготовлення бунтового прокату, призначеного для холоднодеформованих високоміцних металовиробів відповідального призначення.

У разі відсортування БЛЗ зі сталей перлітного класу, які містять 0,50...0,90 % C, через відхилення їх якісних показників від нормативних (значний розвиток ліквациї або вміст НВ) з'являється можливість перепризначення їх під виробництво арматурного прокату класів міцності A800 і A1000. За результатами експериментів розроблено технічну угоду № ТС-001-2412-2015 на виробництво дослідних партій термічно зміцненого арматурного прокату класів міцності A800 і A1000 зі сталей, які містять 0,50...0,90 % C.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на визначення критичних

температур самовідпуску, які гарантовано забезпечать відсутність тріщин на поверхні арматурного прокату залежно від заданого класу міцності, а також дослідження мінливості механічних властивостей протягом часу та впливу окремого нагрівання на їх зміну.

Висновки

Відповідно до результатів промислових експериментів встановлено особливості впливу параметрів режиму термічного зміцнення на формування структури і механічних властивостей арматурного прокату зі сталей перлітного класу.

Науково доведено можливість виготовлення арматурного прокату класів міцності A800 і A1000 зі сталей, які містять 0,50...0,90 % вуглецю, що доцільно, оскільки сприятиме поліпшенню техніко-економічних показників під час виготовлення бунтового прокату у разі відсортування БЛЗ.

Показано, що механічні властивості арматурного прокату різних профілів у більшості випадків відповідають вимогам ДСТУ 3760:2019 для класів міцності A800 і A1000.

За даними металографічного аналізу встановлено, що з точки зору підвищення рівномірності розподілу структурних складових за поперечним перерізом арматурного прокату найбільш сприятливою технологією термічного зміцнення для сталей перлітного класу є спосіб переривчастого гартування.

Розроблено технічну угоду № ТС-001-2412-2015 на виробництво дослідних партій термічно зміцненого арматурного прокату класів міцності A800 і A1000 зі сталей, які містять 0,50...0,90 % C.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Парусов Э. В., Парусов В. В., Сагура Л. В., Сивак А. И., Клименко А. П. Разработка режима термомеханической обработки катанки из стали 85, микролегированной бором, на основе закономерностей превращений аустенита при непрерывном охлаждении. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 3. С. 54–58.
2. Парусов Э В. и др. Режим двухстадийного охлаждения катанки из стали 80КРД на линии Стиллмор. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 3. С. 64–67.

3. Парусов Э. В., Сычков А. Б., Губенко С. И., Долгий С. В., Сагура Л. В. Обоснование параметров регулируемого охлаждения бунтового проката из высокоуглеродистой стали в потоке проволочного стана 320/150 ОАО «ММЗ». *Вестник НТУУ «КПИ». Серия: Машиностроение*. 2016. № 2 (77). С. 62–70. URL: <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2016.77.73756>.
4. Парусов Э. В., Сычков А. Б., Губенко С. И., Чуйко И. Н. Перспективы использования экологически чистого способа подготовки поверхности бунтового проката к волочению. *Проблемы трибологии*. 2016. № 2 (80). С. 74–82.
5. Parusov E. V., Parusov V. V., Sagura L. V., Derevyanchenko I. V., Dolgiy S. V., Gremechev S. A., Demyanova L. I. Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 5. Pp. 100–104.
6. Парусов Э. В., Губенко С. И., Парусов О. В., Чуйко И. М. Розробка сучасного енергоефективного способу виробництва холоднодеформованої арматури для поперечно напружених залізобетонних конструкцій. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2018. № 30 (1306). 2018. С. 39–45.
7. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения : монография. Под общей редакцией М. В. Чукина. Москва : Металлургиздат, 2014. 276 с.
8. Парусов Э. В., Губенко С. И., Сычков А. Б., Сагура Л. В., Чуйко И. Н. Изменение характеристик и компонентного состава неметаллических включений на различных технологических этапах производства бунтового проката. *Спеціальна металургія : вчора, сьогодні, завтра* : матер. XV всеукр. наук.-практ. конф., (м. Київ, 11 квітня 2017 р.). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 818–837.
9. Сычков А., Парусов Э. Моллер А. Технология термической обработки арматурного и фасонного проката в потоке сортовых станов (Теория и металлургическая практика). Germany-Mauritius : Palamarium Academic Publishing, 2017. 261 с.
10. Кугушин А. А. и др. Высокопрочная арматурная сталь. Москва : Металлургия, 1986. 272 с.
11. Парусов В. В. и др. Термомеханическая обработка проката из непрерывнолитой заготовки малого сечения : монография. Запорожье : ЗГУ, 2000. 142 с.
12. Парусов Э. В., Парусов О. В., Раздобреєв В. Г., Чуйко И. М., Долгий С. В. Про можливість виробництва стрижневого арматурного прокату періодичного профілю з високовуглецевих сталей. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ім. проф. Михальова О. І.* : матер. міжнар. наук.-техн. конф. (м. Дніпро, 17–19 березня 2020 р.). Дніпро : НМетАУ, 2020. С. 55–59.
13. Парусов Э. В., Парусов О. В., Раздобреєв В. Г., Чуйко И. Н., Долгий С. В. Расчет и моделирование параметров режима деформационно-термической обработки при производстве бунтового проката периодического профиля из высокоуглеродистой стали. *Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : сб. матер. VIII междунар. конф.* (г. Москва, Россия, 19–22 ноября 2019 г.). Москва : ИМЕТ РАН, 2019. С. 129–131.
14. Парусов Э. В., Парусов В. В., Луценко В. А., Сычков А. Б., Парусов О. В., Чуйко И. Н. Взаимосвязь структурных, механических и технологических характеристик катанки из стали 80 КРД. *Стальные канаты : сб. научн. тр.* Одесса : «Астропринт», 2007. С. 155–161.
15. Парусов Э. В., Губенко С. И., Луценко В. А., Сычков А. Б., Веденеев А. В. Взаимосвязь предельной деформируемости бунтового проката при волочении с параметрами его микроструктуры. *Литье и металлургия*. (Белоуссия). 2016. № 3 (84). С. 75–81.
16. Парусов В. В., Парусов Э. В., Чуйко И. Н., Сычков А. Б., Деревянченко И. В. Взаимосвязь толщины и удельной массы окислы на поверхности высокоуглеродистой катанки. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2004. Вып. 27, ч. 2. С. 26–29.
17. Сычков А. Б. и др. Высокоуглеродистая катанка для изготовления высокопрочных арматурных канатов : монография. Бендеры : Полиграфист, 2010. 280 с.
18. Сычков А. Б., Жигарев М. А., Перчаткин А. В. и др. Неметаллические включения в высокоуглеродистой стали. *Литье и металлургия*. (Белоруссия). 2011. № 3 (62). С. 91–99.
19. Губенко С. И., Парусов Э. В. Пластичность сплавов с различной структурой : учеб. пособ. по физическим основам пластичности. Germany – Mauritius : Palamarium Academic Publishing, 2017. 183 с.
20. Парусов Э. В., Губенко С. И., Сычков А. Б., Сагура Л. В. О влиянии дислокационной субструктуры горячей деформации и микродобавок бора на формирование пластинчатого перлита в процессе непрерывного охлаждения бунтового проката. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 3. С. 40–46.
21. Вакуленко И. А., Раздобреєв В. Г., Перков О. Н. Высокоэффективный термомеханически упрочненный арматурный прокат. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2007. Вип. 14. С. 232–234. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2007_14_53.

REFERENCES

1. Parusov E.V., Parusov V.V., Sahura L.V., Sivak A.I. and Klimenko A.P. *Razrabotka rezhima termomekhanichskoi obrabotki katanki iz stali 85, mikrolegirovannoi borom, na osnove zakonornosti prevraschenii*

austenita pri nepreryvnom okhlazhdenii [Development of a regime for thermomechanical processing of wire rod made of 85 steel microalloyed with boron, based on the regularities of austenite transformations during continuous cooling]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2015, no. 3, pp. 54–58. (in Russian).

2. Parusov E.V. et al. *Rezhim dvukhstadiinogo okhlazhdeniia katanki iz stali 80KRD na linii Stelmor* [Two-stage cooling mode for 80KRD steel wire rod on the Stelmor line]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2006, no. 3, pp. 64–67. (in Russian).

3. Parusov E.V., Syshkov A.B., Gubenko S.I., Dolgii S.V. and Sahura L.V. *Obosnovanie parametrov rehurliemogo okhlazhdeniia buntovoho prokata iz vysokouglerodistoi stali v potoke provolochnoho stana 320/150 OAO «MMZ»* [Substantiation of the parameters of controlled cooling of high-carbon steel wire rod in the flow of the wire mill 320/150 of OJSC «MSW»]. *Vestnik NTUU «KPI». Serii: Mashinostroenie* [Bulletin of NTUU «KPI». Series: Mechanical Engineering]. 2016, no. 2 (77), pp. 62–70. (in Russian). URL: <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2016.77.73756>.

4. Parusov E.V., Syshkov A.B., Gubenko S.I. and Chuiko I.N. *Perspektivy ispol'zovaniya ekologicheskii chistogo sposoba podgotovki poverhnosti buntovoho prokata k volocheniyu* [Prospects using environmentally friendly method of preparing the surface of wire rod for drawing]. *Problemy tribologii* [Problems of Tribology]. 2016, no. 2 (80), pp.74–82. (in Russian).

5. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V., Derevyanchenko I.V., Dolgii S.V., Gremechev S.A. and Demyanova L.I. Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016, no. 5, pp. 100–104.

6. Parusov E.V., Gubenko S.I., Parusov O.V. and Chuiko I.M. *Rozrobka suchasnoho enerhoeffektyvnoho sposobu vyrobnytstva holodnodeformovanoi armatury dlia poperedn'oi napruzhenykh zalizobetonnykh konstrukttsii* [Development of a modern energy-efficient method for the production of cold-deformed reinforcement for prestressed reinforced concrete structures]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Innovatsiini tekhnologii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Innovative technologies and the possession of processing materials from machinery and metallurgy]. 2018, no. 30 (1306), 2018, pp. 39–45. (in Ukrainian).

7. *Proizvodstvo vysokoprochnoi stalnoi armatury dlia zhelezobetonnykh shpal novoho pokoleniia* Production of high-strength steel reinforcement for new generation reinforced concrete sleepers]: monohrafiia. General edited by M.V. Chukina. Moscow: Metallurhizdat Publ., 2014, 276 p. (in Russian).

8. Parusov E.V., Gubenko S.I., Syshkov A.B., Sahura L.V. and Chuiko I.N. *Izmenenie kharakteristik i komponentnoho sostava nemetallicheskiikh vklucheni na razlichnykh tekhnologicheskikh etapakh proizvodstva buntovoho prokata* [Changes in the characteristics and composition of non-metallic inclusions at various technological stages of wire rod production]. *Spetsialna metallurhiia: vchora, siohodni, zavtra: materialy XV vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii* [Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow: materials of the XV all-Ukrainian scientific-practical conference]. Kyiv, April 11, 2017. Kyiv: KPI of Igor Sikorsky, 2017, pp. 818–837. (in Russian).

9. Syshkov A., Parusov E. and Moller A. *Tekhnolohiia termicheskoi obrabotki armaturnoho i fasonnoho prokata v potoke sortovykh stanov (Teoriia i metallurhicheskaiia praktika)* [Heat treatment technology of reinforcing bars and structural shapes in the flow of section mills (Theory and metallurgical practice)]. Germany – Mauritius: Palamarium Academic Publishing, 2017, 261 p. (in Russian).

10. Kuhushin A.A. et al. *Vysokoprochnaia armaturnaia stal* [High strength reinforcing steel]. Moscow: Metallurhiia Publ., 1986, 272 p. (in Russian).

11. Parusov V.V. et al. *Termomekhanicheskaiia obrabotka prokata iz nepreryvnolitoi zahotovki maloho secheniia* [Thermomechanical treatment of rolled products from continuously cast billets of small section: monograph]. Zaporozhie: ZHU, 2000, 142 p. (in Russian).

12. Parusov E.V., Parusov O.V., Razdobreev V.H., Chuiko I.M. and Dolgii S.V. *Pro mozhlyvist byrobnytstva stryzhnevoho armaturnoho prokatu periodychnoho profilu z vysokovehletsevykh stalei* [On the possibility of production of rebars of periodic profile from high-carbon steels]. *Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni im. prof. Mykhaliova O. I.: mater. mizhnar. nauk.-tekhn. konf.* [Information technologies in metallurgy and mechanical engineering named prof. Mikhaleva O. I.: mater. international scientific and technical conf.]. Dnipro, March 17–19, 2020. Dnipro: NMetAU, 2020, pp. 55–59. (in Ukrainian).

13. Parusov E.V., Parusov O.V., Razdobreev V.H., Chuiko I.M. and Dolgii S.V. *Raschet i modelirovanie parametrov rezhima deformatsionno-termicheskoi obrabotki pri proizvodstve buntovoho prokata periodicheskoho profilia iz vysokouglerodistoi stali* [Calculation and modeling of the parameters of the mode of deformation-heat treatment in the production of coiled rolled products of periodic profile from high-carbon steel]. *Deformatsiia i razrushenie materialov i nanomaterialov: sb. mater. VIII mezhdunar. konf.* [Deformation and destruction of materials and nanomaterials: coll. of mater. VIII International. Conf.]. Moscow, Russia, November 19–22, 2019. Moscow: IMMS RNA, 2019, pp. 129–131. (in Russian).

14. Parusov E.V., Parusov V.V., Lutsenko V.A., Syshkov A.B., Parusov O.V. and Chuiko I.N. *Vzaimosviaz strukturnykh, mekhanicheskikh i tekhnolohicheskikh kharakteristik katanki iz stali 80KRD* [Interrelation of structural,

mechanical and technological characteristics of wire rod made of 80KRD steel]. *Stalnye kanaty : sb. nauchn. tr.* [Steel ropes : coll. of scient. papers]. Odessa : Astroprint Publ., 2007, pp. 155–161. (in Russian).

15. Parusov E.V., Gubenko S.I., Lutsenko V.A., Sychkov A.B. and Vedenev A.V. *Vzaimosvaz predelnoi deformiruemosti buntovogo prokata pri volochanii s parametrami ego mikrostruktury* [The relationship of the ultimate deformability of wire rod during drawing with the parameters of microstructure]. *Litio i metallurhiia (Belorussiiia)* [Casting and Metallurgy (Belarus)]. 2016, no. 3 (84), pp. 75–81. (in Russian).

16. Parusov V.V., Parusov E.V., Chuiko I.N., Sychkov A.B. and Derevianchenko I.V. *Vzaimosvaz tolschiny i udelnoi massy okaliny na poverkhnosti vysokouhlerodistoi katanki* [Relationship between thickness and specific gravity of scale on the surface of high-carbon wire rod]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2004, vol. 27, part 2, pp. 26–29. (in Russian).

17. Sychkov A.B. et al. *Vysokouhlerodistaia katanka dlia izhotovleniia vysokoprochnykh armaturnykh kanatov* [High-carbon wire rod for the manufacture of high-strength reinforcing ropes : monograph]. Bendery : Poligrafist Publ., 2010, 280 p. (in Russian).

18. Sychkov A.B., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V. et al. *Nemetallicheskie vklucheniia v vysokouhlerodistoi stali* [Non-metallic inclusions in high carbon steel]. *Litio i metallurhiia (Belorussiiia)* [Casting and Metallurgy (Belarus)]. 2011, no. 3 (62), pp. 91–99. (in Russian).

19. Gubenko S.I. and Parusov E.V. *Plastichnost' splavov s razlichnoy strukturoy: uchebnoye posobiye po fizicheskim osnovam plastichnosti* [Plasticity of alloys with various structures : Study guide on the physical basics of plasticity]. Germany – Mauritius : Palamarium Academic Publishing, 2017, 183 p. (in Russian).

20. Parusov E.V., Gubenko S.I., Syshkov A.B. and Sahura L.V. *O vliyanii dislokacionnoy substruktury goryachej deformacii i mikrodozavok bora na formirovanie plastinchatogo perlita v processe nepreryvnogo ohlazhdeniya buntovogo prokata* [On the influence of the dislocation substructure of hot deformation and boron microadditions on the formation of lamellar pearlite in the process of continuous cooling of wire rod]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 3, pp. 40–46. (in Russian).

21. Vakulenko I.A., Razdobreev V.H. and Perkov O.N. *Vysokoeffektivnyi termomekhanicheski uprochnennyi armaturnyi prokat* [Highly efficient thermomechanically hardened reinforcing bars]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named Academician V. Lazaryan]. 2007, vol. 14, pp. 232–234. (in Russian). URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2007_14_53.

Надійшла до редакції : 20.06.2021.