

Э. В. Парусов /к. т. н./, И. Н. Чуйко /к. т. н./,
Л. В. Сагура /к. т. н./, А. И. Сивак
Институт черной металлургии
им. З. И. Некрасова НАНУ

А. Б. Сычков /д. т. н./
Магнитогорский государственный технический
университет имени Г. И. Носова

Технология квазипатентирования бунтового проката больших диаметров в потоке линии Стелмор

Разработана технология высокотемпературной деформационно-термической обработки бунтового проката, которая позволила обеспечить равномерность распределения перлитной структуры в поперечном сечении, снизить глубину обезуглероженного слоя и повысить исходную прочность металла при одновременном повышении характеристик пластичности.

В результате промышленного опробования принципиально нового технологического подхода к охлаждению высокоуглеродистого бунтового проката в потоке непрерывного проволочного стана с использованием тепла прокатного нагрева комплексно достигнуты максимально возможные наилучшие качественные показатели проката диаметром 10,0 мм, которые ранее считались недостижимыми. (Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 12 назв.)

Ключевые слова: бунтовой прокат, высокоуглеродистая сталь, деформационно-термическая обработка, перлит, прочность, обезуглероженный слой.

The technology of deformation-thermal treatment bundle rolled metal that will ensure uniformity of distribution of the pearlite structure over the cross section, reducing the depth of decarbonized layer, increase the initial strength of the metal while improving ductility characteristics was developed.

As a result, the industrial implementation of a fundamentally new approach to cooling of high-carbon bundle rolled metal in a stream of high-speed continuous wire mill using heat rolling heating comprehensively achieved as much as possible the best quality indicators bundle rolled metal diameter of 10,0 mm, which were previously considered unattainable.

Key words: bundle rolled metal, high-carbon steel, deformation-thermal treatment, pearlite, strength, decarbonized layer.

Введение

Современные мировые тенденции в промышленном и гражданском строительстве, мостостроении и железнодорожной инфраструктуре определяют эти отрасли преимущественными потребителями металлопродукции ответственного назначения. Значительную долю в общем объеме такой металлопродукции составляет высокопрочная металлическая арматура, изготавливаемая в виде высокопрочной проволоки и канатов, которая используется в особо ответственных конструкциях низкой релаксационной способности мостовых пролетов (в том числе вантовых натяжителей мостов), виадуков, автомагистралей, железнодорожных шпал нового поколения для высокоскоростных и тяжело нагруженных магистралей, обрешеченных конструкций путевых переездов.

Требования к классу прочности проволочных элементов таких конструкций (1670; 1770; 1860 и 2000 МПа) обуславливают необходимость использования при их изготовлении высокоуглеродистого бунтового проката (катанки) диаметром 8,0...16,0 мм со значениями временного

сопротивления разрыву более 1150 МПа и высоким уровнем исходной пластичности [1–5].

В условиях европейских металлургических предприятий (ArcelorMittal Hamburg, Ovako, FNSteel) обеспечение таких требований достигается за счет легирования стали дорогостоящими химическими элементами (ванадий в количестве до 0,10 %, хром – до 0,30 % либо при их совместном вводе в сталь). Процесс изготовления высокопрочной проволоки на отечественных метизных заводах и предприятиях ближнего зарубежья в большинстве случаев связан с необходимостью применения в производственном цикле экологически вредной и энергозатратной операции начальной и/или промежуточной термической обработки (патентирования) в расплавах солей, свинца или псевдосжиженном слое.

Современное состояние вопроса

Высокоуглеродистый бунтовой прокат больших диаметров (8,0...16,0 мм), изготовленный отечественными металлургическими предприятиями, как правило, имеет значительный разброс значений временного сопротивления

(~120 МПа) в пределах плавки и весьма низкие значения характеристик пластичности (относительное сужение ~19...22 %, относительное удлинение ~6...8 %) в сравнении с катанкой из аналогичных марок стали мелких диаметров (5,5...6,5 мм). Указанная особенность является не только следствием использования устаревшей нормативной документации при изготовлении металлопроката (ДСТУ 3683-98, ГОСТ 14959-79), но и применением на практике единого подхода в процессе деформационно-термической обработки на стадии регулируемого охлаждения проката как малых, так и больших диаметров. Следовательно, изготовление высокопрочной проволоки (арматурная проволока гладкого и периодического профилей, стальные арматурные канаты и т. п.) из высокоуглеродистого бунтового проката больших диаметров методом холодного волочения фактически невозможно без применения операции патентирования.

С точки зрения снижения себестоимости и повышения экономических показателей в качестве исходного сырья для изготовления высокопрочной проволоки целесообразно использовать высокоуглеродистую катанку, которая не содержит дополнительных легирующих элементов, а совершенствование режимов термической или термомеханической обработки бунтового проката проводить, если это возможно, без дорогостоящей модернизации существующего технологического оборудования для поточной термической обработки типа линий Стелмор.

Создание надежных и высокопрочных армирующих и натяжных конструкций различного назначения является основной задачей соответствующих отраслей промышленности. Технология изготовления арматурного проката за последние десятилетия активно развивалась в направлении повышения прочностных характеристик металла с целью снижения веса железобетонных и иных конструкций. При этом основная задача заключалась в снижении степени легирования стали за счет совершенствования режимов термомеханической обработки металла в потоке непрерывных проволочных и сортовых линий. В настоящее время производство горячекатаного проката заменяется термически и термомеханически упрочненным металлом ввиду того, что он не отвечает современным требованиям к прочностным, пластическим и эксплуатационным характеристикам [1-5].

В течение последних 15...20 лет ОАО «Молдавский металлургический завод», г. Рыбница, Молдова (ОАО «ММЗ») завоевал положительный имидж на европейских рынках сбыта металлопроката. Этому способствовал постоянный поиск и применение новых техно-

логических решений в производственном процессе и, как следствие, высокое качество изготавливаемой продукции. Стоит отметить и высокий технологический уровень оснащенности указанного металлургического предприятия: 120-тонная электросталеплавильная печь, установка печь-ковш, камерный вакууматор типа VD/VOD, шестиручьева радиальная машина непрерывного литья заготовок, двухниточный мелкосортно-проволочный стан с высокоскоростным проволочным блоком (скорость прокатки до 100 м/с), современная линия двухстадийного водо-воздушного охлаждения типа «длинный Стелмор» [4-7].

Начиная с 2007 г. в содружестве с творческим коллективом ученых Института черной металлургии (Украина, г. Днепропетровск) в условиях ОАО «ММЗ» началось промышленное освоение производства высокоуглеродистого бунтового проката больших диаметров (8,0...12,0 мм). С 2012 г. в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») проведено исследование термической обработки бунтового проката диаметром 15,5...16,0 мм из высокоуглеродистой стали типа 80 с микродобавками бора. Для повышения прочностных характеристик бунтового проката в сталь вводили не только легирующие добавки бора, но и ванадий, хром и алюминий [6-8]. Отрабатывали новые режимы высокотемпературной деформационно-термической обработки, которые могли позволить добиться значительного улучшения качественных характеристик металлопроката.

Цель настоящей работы

Выявление новых закономерностей структурообразования в высокоуглеродистых сталях при изменении основных технологических параметров деформационно-термической обработки.

Материалы для исследований

Промышленные партии горячедеформированного бунтового проката диаметром 10,0 мм из стали марки 85, микролегированной бором. В качестве методов исследования применяли металлографический анализ (оптическая и растровая микроскопия). Используемые приборы: световые микроскопы Neophot 32 и Axiovert 200 M MAT, автоматический анализатор изображения IA-3001, электронные микроскопы EF-2 и VEGA TS5130MM.

Результаты исследований

В ходе выполнения исследований было установлено, что главными технологическими параметрами, ответственными за формирование требуемых качественных показателей бунтового проката, являются: температура выхода металла

из чистового блока прокатных клетей, температура виткообразования, скорость перемещения (плотность укладки) витков катанки на роликовом транспортере, количество и мощность задействованных дутьевых воздушных вентиляторов (высоконапорных блоков струйного охлаждения – первые 6 мощность 160 кВт, частота вращения 1480 мин⁻¹, последующие 4 – соответственно, 55 кВт и 750 мин⁻¹) на стадии ускоренного воздушного охлаждения витков проката на транспортере витков линии Стелмор.

Комплексное варьирование технологических параметров деформационно-термической обработки при производстве бунтового проката больших диаметров из сталей марок С78D, С80D и С82D (EN 10016; EN 16120), 80P (контрактные требования), из стали с добавками вышеуказанных легирующих элементов доказало свою эффективность. В качестве легирующих элементов в указанные марки стали осуществлялся ввод ванадия (до ~0,10 %), хрома (до ~0,30 %). Микролегирование стали бором осуществлялось в соответствии с эмпирическим выражением [9]:

$$B = ((0,82 - 0,74 \times C) \pm 0,1) \times N,$$

где В – содержание бора, %; С, N – содержание углерода и азота в стали, определенное методом ковшевой пробы, %.

Достигнутые значения временного сопротивления при этом составили 1200...1280 МПа в зависимости от готового профилеразмера проката. Однако для обычной высокоуглеродистой стали диаметром 10,0...12,0 мм без применения дополнительного ввода легирующих элементов требуемые значения временного сопротивления так и не были достигнуты ($\sigma_b \leq 1130$ МПа), что свидетельствовало о неэффективности применяемых режимов деформационно-термической обработки проката на линии Стелмор, которые не обеспечивали необходимое ускоренное воздушное охлаждение витков катанки и, соответственно, формирование необходимой микроструктуры.

Следует отметить, что высокоуглеродистый бунтовой прокат больших диаметров предназначен в основном для изготовления конструкций высокой прочности, в том числе плит перекрытий, конструкций автомагистралей, виадуков, железнодорожных переездов и вантовых мостов. Ввиду того, что перечисленные строительные конструкции в той или иной мере связаны с безопасностью человеческой жизни, то становится очевидным, что такая катанка является ответственным видом металлопродукции, к качественным показателям которой по праву предъявляются весьма жесткие требования. Потребителями такой металлопродукции

являются современные метизные предприятия, расположенные, как правило, на территории стран ЕС, которые используют энерго- и ресурсосберегающие технологические схемы переработки проката с минимальными издержками производства и высокой экологической безопасностью. В последнее время появился ряд предприятий-переработчиков такого бунтового проката и в странах ближнего зарубежья.

Процесс изготовления высокопрочной арматурной проволоки и стальных арматурных канатов довольно трудоемок и связан с большим количеством технологических операций.

Современная технологическая схема изготовления высокопрочной проволоки не включает операцию патентирования, цель которой заключается в сорбитизации микроструктуры бунтового проката перед волочением, в результате чего повышается исходная прочность металла при сохранении достаточно высоких показателей пластичности [10].

Становится очевидным, что применение современной технологической схемы изготовления высокопрочной проволоки методом прямого волочения предопределяет использование высококачественного исходного сырья – сорбитизированного бунтового проката, изготовленного с применением рациональных режимов деформационно-термической обработки на линии Стелмор с использованием тепла прокатного нагрева.

Однако, как отмечено выше, основной сложностью при изготовлении бунтового проката из обычной высокоуглеродистой стали является необходимость обеспечения требуемого уровня прочности металла.

В настоящей работе исследования были направлены на поиск новых резервных возможностей совершенствования структурного состояния и качественных показателей высокоуглеродистых сталей при разработке принципиально новых режимов высокотемпературной деформационно-термической обработки, которые позволят достичь требуемого уровня качественных характеристик металла в потоке линии Стелмор.

Для разработки и внедрения технологии сорбитизации высокоуглеродистого металла с прокатного нагрева в условиях ОАО «ММЗ» были проведены технологические мероприятия, которые заключались в дополнительной герметизации участка ускоренного воздушного охлаждения, с целью исключения подсоса воздуха и переносе 2 высоконапорных блоков струйного охлаждения с частотой вращения 750 мин⁻¹ из хвостовой части в начало линии Стелмор.

Опробование опытной технологии изготовления проводили на высокоуглеродистой ста-

ли марки 85, микролегированной бором, по ТУ У 27.1-4-519-2002 «Катанка из качественной углеродистой стали» с дополнительными контрактными требованиями.

Влияние различных факторов на повышение устойчивости метастабильного аустенита и, соответственно, формирование дисперсности образующегося перлита в процессе непрерывного охлаждения детально рассмотрено в работах [11; 12]. Повышение устойчивости метастабильного аустенита в процессе непрерывного охлаждения в производственных условиях осуществлялось путем ввода микродобавок бора в сталь в регламентируемом количестве (согласно вышеприведенному выражению), а температуру раскладки катанки на витки выдерживали в диапазоне 1030...1020 °С, что на 180...130 °С выше стандартно принятых температур в промышленной практике производства высокоуглеродистого бунтового проката. Обычно на металлургических предприятиях температура виткообразования (аустенитизации) выдерживается на уровне 850...900 °С.

Главной отличительной чертой от применяемых в настоящее время режимов охлаждения бунтового проката на линии Стелмор являлось полное отсутствие стадии водяного подохлаждения проката после его выхода из чистового проволочного блока прокатных клетей. Режим охлаждения включал следующие технологические операции: температура конца прокатки и выхода проката из проволочного блока – на уровне 1050 °С; охлаждение водой перед виткообразователем не производится; температура металла на виткообразователе – 1030...1020 °С; ускоренное воздушное охлаждение витков катанки до температур 560...540 °С при открытых теплоизолирующих крышках (в работе 6 вентиляторов с частотой вращения 1480 мин⁻¹ и 2 вентилятора с частотой вращения 750 мин⁻¹); дальнейшее охлаждение под закрытыми теплоизолирующими крышками до температуры ~150 °С.

Исследования, проведенные при помощи оптического микроскопа (рис. 1), свидетельствуют о существенном различии в формирова-

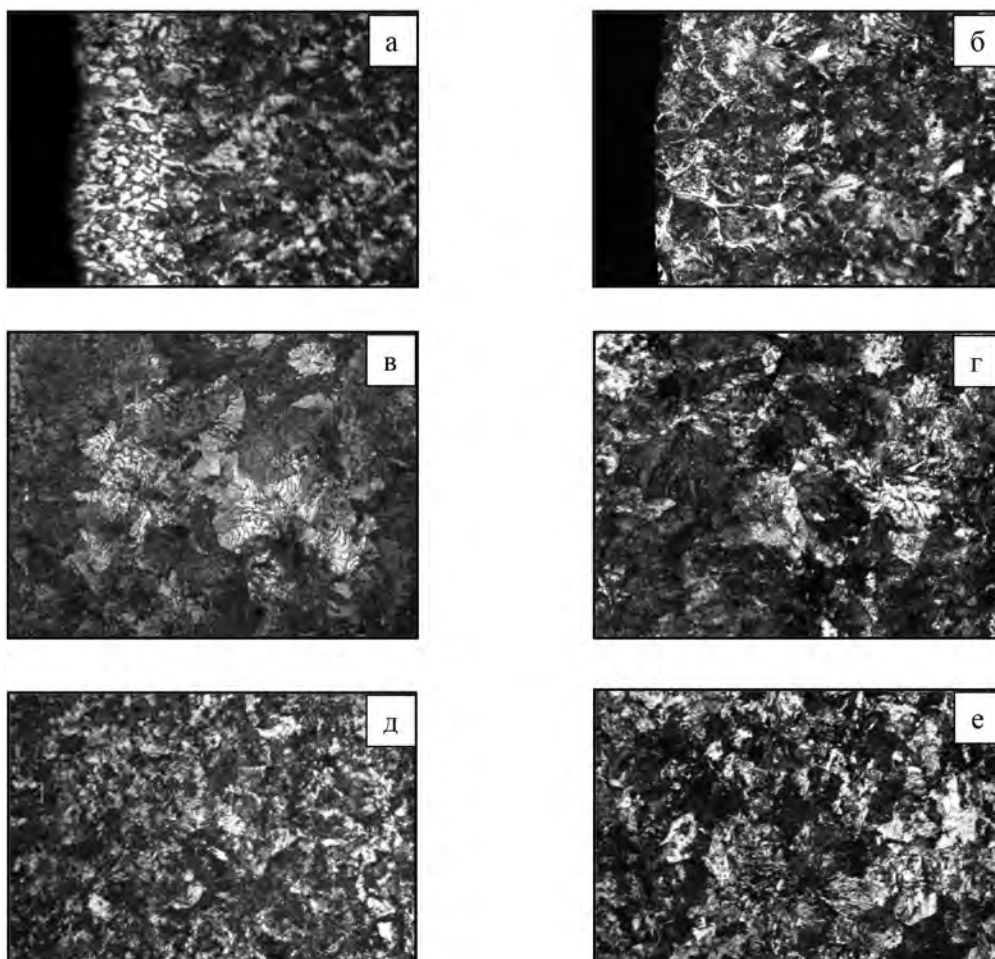


Рис. 1. Микроструктура ($\times 500$) проката в бунтах из стали марки 85Р диаметром 10,0 мм: а, б – поверхность проката, в, г – $\frac{1}{2}$ радиуса проката; д, е – центральная часть проката; а, в, д – базовый режим: температура виткообразования 930...950 °С, средняя скорость ускоренного воздушного охлаждения ~ 8 °С/с; б, г, е – опытный режим: температура виткообразования 1030...1020 °С, скорость ускоренного воздушного охлаждения ~ 18 °С/с

нии микроструктуры бунтового проката, изготовленного по базовому (1) и опытному (2) режимам. Так, в микроструктуре проката, охлажденного по режиму 1, имеются участки грубопластинчатого перлита, который соответствует баллу 10 по ГОСТ 8233-56. В микроструктуре проката, охлажденного по режиму 2, наблюдался максимальный балл пластинчатого перлита на уровне 2..3. Результаты сравнительного анализа качественных показателей бунтового проката, охлажденного по режимам 1 и 2 от различных температур виткообразования, приведены в табл. 1-3.

Анализ полученных данных (табл. 1-3) свидетельствует о том, что увеличение температуры виткообразования на 180...130 °С при одновременном повышении скорости ускоренного воздушного охлаждения до 18 °С/с уменьшает глубину обезуглероженного слоя в среднем в 1,4-1,8 раза, увеличивает количество сорбитообразного перлита 1-го балла в 1,4 раза, исключает появление участков пластинчатого перлита более 3-4 баллов, что является весьма важным критерием для металлопроката, подвергаемого прямому холодному волочению. Помимо указанных различий в структурном состоянии бун-

Таблица 1

Определение глубины обезуглероженного слоя в исследуемых образцах по различным методикам

Номер режима ¹	Глубина обезуглероженного слоя, %			
	По ГОСТ 1763-68		По EN ISO 16120-1:2011	
	Среднее значение	Максимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
1	1,20	1,50	1,12	1,40
2	0,65	1,03	0,62	0,96

¹ 1 – базовый режим, 2 – опытный режим.

Таблица 2

Количественное определение сорбитообразного перлита 1 балла на исследуемых образцах с применением различных методик

Номер режима ¹	Количество перлита 1 балла ² , %	Количество перлита 1 балла ³ , %
1	63	60
	59	58
	65	61
Среднее значение	62	59
2	88	82
	89	84
	85	87
Среднее значение	87	84

¹См. примечание к табл. 1.

²Точечный метод по А. А. Глаголеву.

³Методика EN ISO 16120-1:2011 (D).

Таблица 3

Механические свойства исследуемых образцов бунтового проката диаметром 10,0 мм из стали марки 85¹

Номер режима ²	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное сужение, %	Относительное удлинение, %
1	<u>1122...1145</u> 1138	<u>19...24</u> 23	<u>7...9</u> 8,5
2	<u>1193...1215</u> 1205	<u>28...32</u> 31	<u>10...12</u> 11,5

¹В числителе указаны минимальное и максимальное, в знаменателе – среднее значения.

²См. примечание к табл. 1

тового проката, охлажденного по различным режимам, применение режима 2 по сравнению с режимом 1 повышает значения временного сопротивления на 5 %, а значения относительного сужения и относительного удлинения – на 34 и 35 % соответственно.

Электронно-микроскопический металлографический анализ (рис. 2) показал, что микроструктура перлита в исследуемых образцах бунтового проката, охлажденного по режиму 2, обладает большей дисперсностью по сравнению с режимом 1, а значение межпластиночного расстояния уменьшается на ~23 % и достигает значений 0,142 мкм, что характерно для микроструктуры металла, подвергнутого дополнительной технологической операции – патентированию.

Научная новизна и практическая значимость

В результате проведенного комплекса исследований было установлено, что увеличение температуры виткообразования бунтового проката из стали марки 85 до 1030...1020 °С при одновременном повышении скорости ускоренного воздушного охлаждения до 18 °С/с уменьшает глубину обезуглероженного слоя, увеличивает количество сорбитообразного перлита, исключает появление участков грубодисперсного пластинчатого перлита. Промышленное внедрение принципиально нового подхода к охлаждению высокоуглеродистого бунтового проката в потоке высокоскоростного проволочного стана с использованием тепла прокатного нагрева позволило комплексно достигнуть максимально воз-

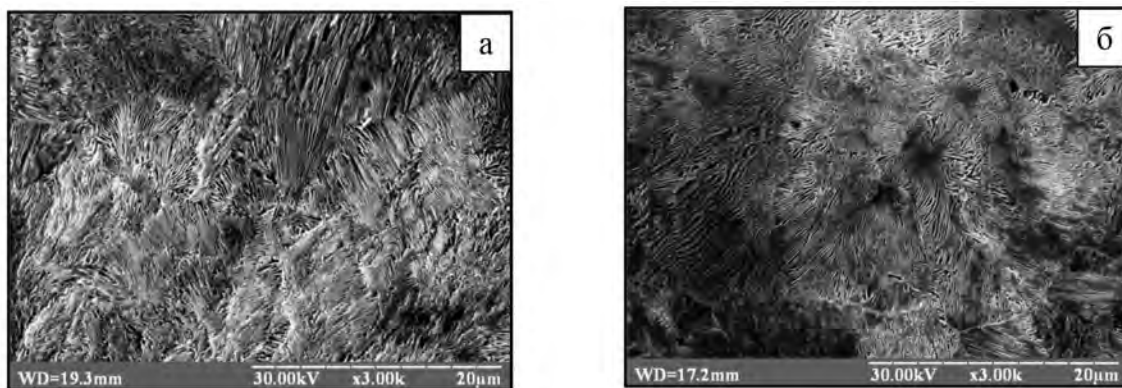


Рис. 2. Микроструктура перлита в бунтовом прокате диаметром 10,0 мм из стали марки 85P, охлажденного с применением различных технологических режимов:

а – технологический режим № 1, 1/2 радиуса образца;
б – технологический режим № 2, 1/2 радиуса образца.

можных качественных показателей бунтового проката диаметром 10,0 мм, которые ранее считались недостижимыми.

Выводы

Разработанная технология деформационно-термической обработки позволила обеспечить равномерность распределения перлитной структуры по сечению бунтового проката из стали марки 85, снизить глубину обезуглероженого слоя, повысить исходную прочность металла при одновременном повышении характеристик пластичности.

Библиографический список

1. Производство арматурной стали / [Л. Н. Левченко, А. С. Натапов, Л. Ф. Машкин и др.]. – М.: Металлургия, 1984. – 136 с.
2. Мадатян С. А. Арматура железобетонных конструкций / С. А. Мадатян. – М.: Воентехлит, 2000. – 256 с.
3. Высокопрочная арматурная сталь / [А. А. Кугушин, И. Г. Узлов, В. В. Калмыков и др.]. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
4. Парусов В. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, Э. В. Парусов. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2012. – 376 с.
5. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки / [А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. Ю. Столяров и др.]. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2014. – 257 с.
6. Отчет о НИР ГР № (ЦИТИС) 01201267220. Повышение качества высокоуглеродистой катанки на базе совершенствования сквозной тех-

нологии выплавки стали, ее внепечной обработки, непрерывной разливки, производства сортового проката и метизного производства / Руководитель А. Б. Сычков; МГТУ им. Г. И. Носова, ОАО «ММК», 2013. – 117 с.

7. Сычков А. Б. Развитие устройств и способов для термической обработки катанки / А. Б. Сычков, С. О. Малашкин, М. А. Жигарев // Сталь. – 2015. – № 10. – С. 50–54.

8. Высокоуглеродистая катанка из стали, микролегированной ванадием / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, И. В. Деревянченко [и др.] // Металлург. – 2004. – № 12. – С. 63–67.

9. Патент 103113, Украина, МПК С22С 38/32 С22С 38/54. Сталь для глубокого волочения / В. В. Парусов, О. В. Парусов, Э. В. Парусов [и др.]. – № а201203164; Заявл. 19.03.2012; Опубл. 10.09.2013. – 2013. – № 17.

10. Парусов Э. В. Требования, предъявляемые к катанке для производства высокопрочной канатной арматуры / Э. В. Парусов // Теория и практика металлургии. – 2014. – № 1–2. – С. 67–70.

11. Влияние вида обработки на величину аустенитного зерна высокоуглеродистой стали / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – Днепропетровск: Візіон, 2014. – Вып. 28. – С. 296–299.

12. Влияние величины зерна и других факторов на дисперсность перлита углеродистых сталей / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 2014. – Вып. 73. – С. 186–190.

Поступила 30.03.2016