

ОПЫТ ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ПО ПРОИЗВОДСТВУ РУЛОННОГО ПРОКАТА ДЛЯ ФОРМОВКИ КОЛТЮБИНГОВЫХ ТРУБ

УДК 621.774.35:643.07

К.А. Барабошкин, АО «Северсталь Менеджмент» (Москва, Россия),
ka.baraboshkin@severstal.com

Т.С. Вархалева, АО «Северсталь Менеджмент», tsvarhaleva@severstal.com

П.А. Глухов, АО «Северсталь Менеджмент», pa.glukhov@severstal.com

С.М. Тихонов, к.т.н., ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС» (Москва, Россия),
tserg491@yandex.ru

Один из важных технических элементов, применяемых при современной нефтегазодобыче, – колтюбинговые трубы, которые представляют собой гибкие непрерывные прямошовные трубы большой длины. Для них характерны специальные эксплуатационные требования, в частности высокая коррозионная стойкость, пластичность и прочность. В настоящее время на российском рынке колтюбинговой техники доминируют зарубежные компании, однако необходимость импортозамещения определяет целесообразность разработки технологии производства отечественной металлопродукции данного сортамента. При этом уровень ключевых эксплуатационных свойств определяется в основном характеристиками и структурой проката, применяющегося для изготовления колтюбинговых труб.

Обычно при производстве данного сортамента труб используется низколегированный малоуглеродистый прокат. Требуемый уровень его эксплуатационных свойств достигается за счет оптимизации технологических параметров выплавки и прокатки. В статье рассмотрен механизм структурообразования при производстве указанного проката и предложена концепция его легирования на основе композиции Cu-Cr-Ni с микролегированием Nb-Ti-V. Поскольку на интенсивность коррозионного разрушения трубной стали значительно влияет содержание коррозионно-активных неметаллических включений, предложены меры по минимизации их концентрации на основе алюминатов магния (алюмомагниева шпинель) с сульфидной составляющей (из сульфида марганца и кальция) на сталеплавильном переделе.

В рамках решения указанной задачи ПАО «Северсталь» совместно с Национальным исследовательским технологическим университетом «МИСиС» (при непосредственном участии авторского коллектива статьи) была разработана технология производства рулонного проката марки А606 («Северкор»/Cordis) категории прочности К 52 – К 56 из низколегированной малоуглеродистой стали 07ХНД. Приведены базовые эксплуатационные свойства полученного продукта и колтюбинговых труб из него, включая структурно-фазовые параметры и особенности влияния степени предварительной деформации проката на уровень прочностных характеристик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КОЛТЮБИНГОВЫЕ ТРУБЫ, НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЙ ПРОКАТ, МАЛОУГЛЕРОДИСТЫЙ ПРОКАТ, КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЙ ПРОКАТ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Одна из задач предприятий отечественного нефтегазового комплекса – интенсивное развитие технологии добычи углеводородных ресурсов. Увеличение объемов горизонтального бурения и все более сложные конструкции скважин требуют специального

подхода к технике внутрискважинных работ и создания новых материалов для внедрения современных инноваций. В частности, одним из значимых технических решений в области нефтегазодобычи стало использование колонн из гибких непрерывных прямошовных труб, получивших название

колтюбинговых (от англ. coiled tubing). Они заменяют традиционные сборные бурильные колонны и характеризуются специальными эксплуатационными требованиями, к которым относятся высокая коррозионная стойкость, пластичность и прочность. Поскольку для изготовления этих труб используют

K.A. Baraboshkin, AO Severstal Management (joint-stock company) (Moscow, Russia),

ka.baraboshkin@severstal.com

T.S. Varkhaleva, AO Severstal Management, tsvarhaleva@severstal.com

P.A. Glukhov, AO Severstal Management, pa.glukhov@severstal.com

S.M. Tikhonov, PhD in Engineering, National University of Science and Technology "MISIS"

(Moscow, Russia), tserg491@yandex.ru

Experience of PAO Severstal in producing coiled stock for coiled tubing forming

Coiled tubing is one of the essential technical elements used in modern oil production. They are extensive continuous flexible line-welded pipes with specific operational requirements, particularly, high corrosion resistance, ductility, and strength. To date, foreign companies are dominating the Russian coiled tubing market. However, the need for import substitution determines the feasibility of developing a domestic technology to produce the metal product of this type range. The key performance indicators are mainly determined by the properties and structure of the rolled steel used for coiled tubing production.

This type range is generally produced from low alloy low-carbon rolled coiled stock. The required performance is achieved by optimizing the process parameters of its smelting and rolling. The article considers the structure formation mechanism during production. It also suggests a concept for alloying it with a Cu-Cr-Ni composition with Nb-Ti-V microalloying. Since the intensity of pipe steels' corrosive destruction considerably affects the corrosive nonmetal inclusions content, we proposed measures to minimize their concentration based on magnesium aluminates (Al-Mg spinel) with a sulfide element (made of manganese and calcium sulfides) at the steelmaking section.

To resolve the task, PAO Severstal (public joint-stock company) and the National University of Science and Technology "MISIS" directly involving the authors' team have jointly developed the production technology for K 52 – K 56 strength grade A606 coiled stock (Severkor/Cordis) made of 07KhND low alloy low-carbon steel. The basic performance is given for the product and coiled tubing made of it, including structural phase parameters and the specificities of how the stock's prestrain affects its strength properties.

KEYWORDS: COILED TUBING, LOW ALLOY COILED STOCK, LOW-CARBON COILED STOCK, CORROSION-RESISTANT COILED STOCK, NONMETAL INCLUSIONS.



горячекатаные травленные рулоны, уровень эксплуатационных свойств изделий определяется в основном характеристиками и структурой данного вида проката, получаемого на широкополосных станах. Таким образом, одна из актуальных задач отечественной металлургии состоит в разработке технологии промышленного производства рулонного проката для электросварных колтюбинговых труб, удовлетворяющего указанным выше требованиям.

В наши дни основные поставщики колтюбинговой техники на мировой рынок – американские и канадские компании, продукция которых доминирует и в России. До недавнего времени для изготовления гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ) в нашей стране применялся исключительно импортный прокат марки А606 фирм ArcelorMittal S. A. (Люксембург) и Rautaruukki Oyj (Финляндия). Соответственно, необходимостью решения задач импортозамещения определяется

в том числе целесообразность разработки инновационной технологии производства отечественного проката рассматриваемого сортамента.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАЛЯМ ДЛЯ КОЛТЮБИНГОВЫХ ТРУБ

Для изготовления колтюбинговых труб обычно используются низколегированные малоуглеродистые стали, обеспечивающие требуемый уровень эксплуатационных свойств не за счет легирования,

а благодаря оптимизации технологических параметров процесса металлургического производства, т.е. отмечается ориентация на минимальную себестоимость проката. При содержании углерода в таком металле на уровне $\leq 0,08$ % повышение прочностных характеристик полосы достигается за счет дисперсионного упрочнения, которое имеет место при выделении дисперсных частиц карбонитридов (NbC_xN_y , VC_xN_y) после смотки в рулон [1, 2]. Одновременное снижение концентрации марганца также способствует повышению коррозионной стойкости трубного проката за счет предупреждения образования протяженных включений-ловушек (MnS , Fe_3C , выделения фосфора), а также формирования равномерной мелкозернистой структуры. При этом сравнительно низкий уровень легирования позволяет снизить углеродный эквивалент до уровня $\leq 0,35$, что создает хорошие предпосылки для получения качественного сварного шва на готовой трубе.

Эксплуатационные свойства рулонного проката определяются в первую очередь его структурно-фазовыми характеристиками, связанными с составом используемой легирующей композиции. Для формирования феррито-бейнитной микроструктуры, присущей рассматриваемому сортаменту, используются элементы, повышающие устойчивость аустенита при ламинарном охлаждении (Mo , Ni , Cr , Cu и Nb при нахождении в твердом растворе). Соответственно, для производства рулонного проката с категорией прочности на уровне K 56 при повышенной коррозионной стойкости может быть принята концепция легирования малоуглеродистых низколегированных сталей на основе композиции $Cu-Cr-Ni$ с микролегированием $Nb-Ti-V$. Для такой стали на начальной стадии коррозии оксиды хрома образуют плотный защитный слой на поверхности трубы, который препятствует дальнейшему развитию

процесса. Низкое содержание углерода позволяет минимизировать осевую сегрегацию непрерывнолитой заготовки и способствует сохранению хрома в твердом растворе. Микролегирование $Nb-Ti-V$ сопровождается уменьшением размера зерна, что способствует повышению прочностных характеристик. Механизм действия перечисленных химических элементов заключается в образовании выделений избыточных фаз – карбидов, нитридов и карбонитридов, которые сдерживают миграцию границ зерен, а также могут вызвать упрочнение по механизму дисперсионного твердения [1, 2].

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ И ПРОКАТКИ СТАЛИ С ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ

Следует отметить, что в современных трубных сталях на интенсивность коррозионного разрушения значительно влияет содержание коррозионно-активных неметаллических включений (КАНВ). Поэтому при производстве проката для труб повышенной коррозионной стойкости наряду со снижением концентрации серы в стали до уровня не более 0,001 % необходимо уменьшать загрязненность примесными элементами (S , P и др.) и КАНВ. В первую очередь следует исключить явное негативное влияние КАНВ на основе алюминатов магния (алюмомагниева шпинель) с сульфидной составляющей (из сульфида марганца и кальция) [3, 4].

Соответственно, одним из условий получения высокой коррозионной стойкости рулонного проката стала разработка сталеплавильной технологии, обеспечивающей минимизацию содержания алюминия в плавке за счет выбора рациональных режимов раскисления и вакуумирования. Получение необходимой структуры, механических свойств и коррозионной стойкости для выбранной легирующей композиции стали достигается при измельчении

зерна до минимально возможного уровня за счет использования рациональных температурно-скоростных и деформационных режимов прокатки, ламинарного охлаждения и смотки проката в рулон на широкополосном стане. В рамках решения этой задачи в ПАО «Северсталь» при участии Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» была разработана технология производства рулонного проката марки «Северкор» (далее по тексту – Cordis) категории прочности K 52 – K 56 из низколегированной малоуглеродистой стали 07ХНД [2, 5].

Данная технология предусматривает использование непрерывнолитых заготовок из стали, содержащей минимальное количество углерода – 0,04–0,07 % и марганца – 0,4–0,9 % при уровне содержания кремния 0,1–0,4 %. Прочностные характеристики и коррозионная стойкость проката обеспечиваются содержанием хрома в диапазоне 0,2–0,7 %, меди – 0,3–0,6 %, никеля – 0,15–0,60 %, алюминия – не более 0,03 %, серы – не более 0,003 %, фосфора – не более 0,015 %. Приведенный химический состав соответствует величине углеродного эквивалента в пределах 0,35, т.е. достаточной для получения высокой технологической свариваемости при производстве прямошовных колтюбинговых труб [6, 7].

На сталеплавильном переделе регламентируются порядок и время ввода в расплав легирующих компонентов. Содержание алюминия в металле перед обработкой на установке «печь-ковш» поддерживают на уровне не более 0,04 %, а после окончания обработки – не более 0,03 %. Концентрация этого элемента, вводимого в расплав на установке вакуумирования стали, не превышает 0,045 %, а по завершении операции – 0,02 %. При этом ферротитан добавляют не менее чем за 15 мин до окончания вакуумирования в количестве, достаточном для получения перед



**ГАЗОВАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**
журнал (учредитель - Газпром)

IV Международный конкурс «Нефтегазовые проекты: взгляд в будущее»

www.gifaward.com

Участники: молодые ученые / научный коллектив молодых ученых в возрасте до 35 лет из любой страны. Приветствуются международное научное сотрудничество и совместные проекты молодых ученых из разных стран

НОМИНАЦИИ



Иновационные решения в разведке, добыче, переработке, транспортировке и хранении углеводородов



СПГ-проекты



IT-решения и цифровизация



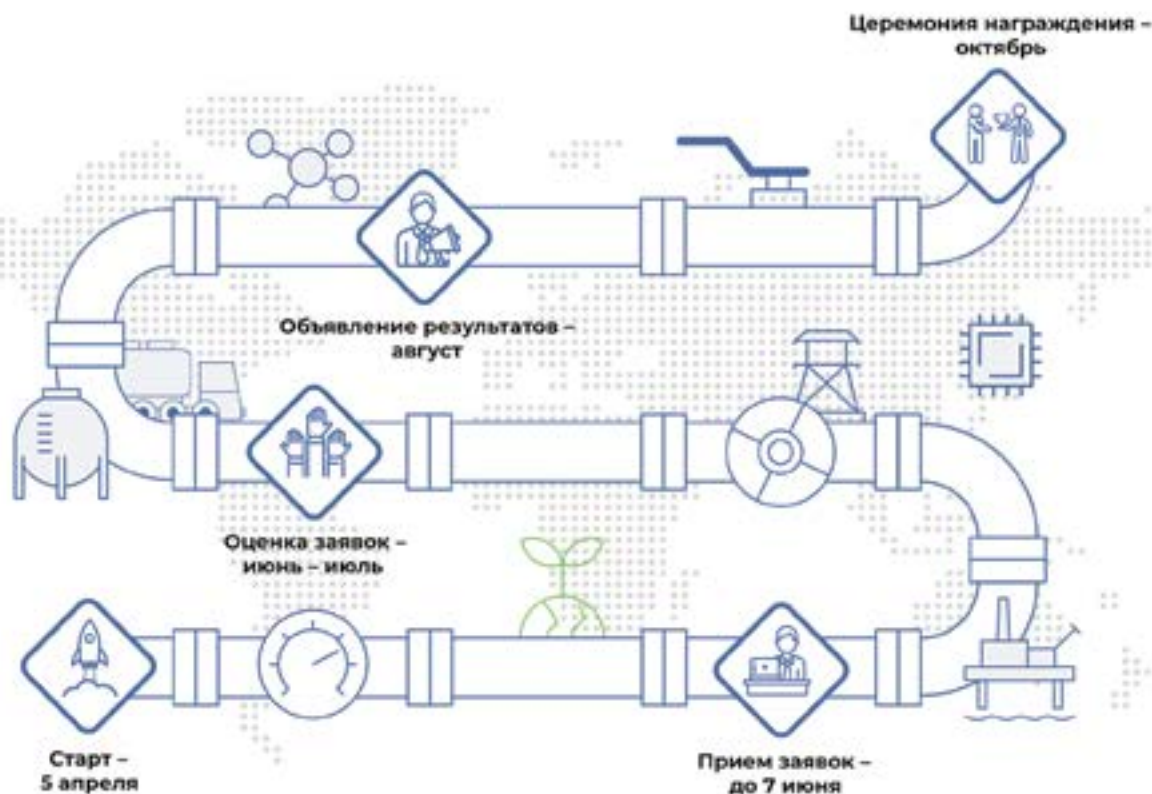
Электроэнергетика



Декарбонизация в отрасли



Морские и шельфовые нефтегазовые проекты



Подробная информация и контакты:

www.gifaward.com | info@gifaward.com | +7 (495) 240-54-57, ext. 124



Таблица. Механические свойства опытной партии рулонного проката*
Table. Mechanical properties of a test lot of coiled stock*

Марка проката Coiled stock grade	σ_y , МПа σ_y , МПа	σ_t , МПа σ_t , МПа	δ , %	Твердость, HRB Brinell hardness, HRB
A606 с прочностью ST70 согласно требованиям [9] A606 with the strength of ST70 according to [9]	≥ 483	≥ 552	≥ 22	≤ 99
A606 (Cordis)	≥ 483	≥ 555	≥ 22	≤ 99

* *Примечание.* σ_y – предел текучести, МПа; σ_t – предел прочности на растяжение (временное сопротивление), МПа; δ – относительное равномерное удлинение, %

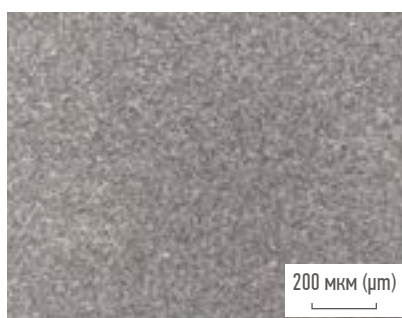
* *Note.* σ_y – yield point, МПа; σ_t – ultimate tensile strength, МПа; δ – proportional elongation percentage

разливкой содержания титана не менее 0,015 %. Такой подход обеспечивает минимизацию концентрации КАНВ типа алюмомагниево-шпинели в выплавленном металле за счет рационального ввода алюминия и упорядочения этого процесса по стадиям внепечной обработки, что способствует повышению коррозионной стойкости [6, 8].

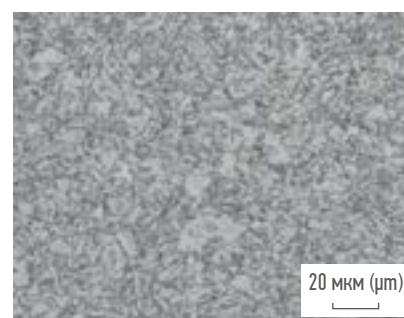
При этом нагрев заготовок для прокатки производят с выдержкой не менее 3 ч. Устанавливают определенную величину их единичных относительных обжатий за проход при черновой и чистовой прокатке, причем температуру последней задают выше 800 °С, а смотку полосы в рулон производят в диапазоне 400–500 °С [7]. Полученный прокат характеризуется преимущественно феррито-бейнитной структурой с размером зерна, соответствующим 11 баллам, а в зоне сварного шва наблюдается измельчение до 12 баллов. Можно отметить минимизацию содержания неметаллических включений в виде точечных оксидов до уровня менее 1 балла, при котором они не должны негативно влиять на коррозионную стойкость трубы.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ ПРОКАТА

Рассмотренные технические решения, полученные в ходе создания технологии производства коррозионно-стойкого рулонного проката Cordis категории прочности К 56 из низколегированной малоуглеродистой стали 07ХНД на широкополосном стане 2000,



а) а)



б) б)

Рис. 1. Микроструктура в сечении горячекатаного травленого проката А606 (Cordis) при увеличениях: а) $\times 100$; б) $\times 1000$
Fig. 1. Micrograph of A606 (Cordis) hot-rolled etched coiled stock section at the following magnifications: а) $\times 100$; б) $\times 1000$

были адаптированы к условиям производства рулонного проката для колтюбинговых труб в диапазоне толщин 3,0–5,2 мм. С использованием разработанного метода удалось организовать изготовление опытно-промышленной партии проката А606 (Cordis) для колтюбинговых труб толщиной 4 мм на стане 2000. Испытания полученных образцов показывают полное соответствие уровня механических свойств требованиям к колтюбинговому прокату марки А606 (табл.).

Оценка структурно-фазовых характеристик изготовленного рулонного проката А606 (Cordis) толщиной 4 мм для производства колтюбинговых труб показывает наличие однородной мелкозернистой структуры, состоящей преимущественно из бейнитного и квазиполигонального феррита. Размер зерен до 16 мкм (рис. 1).

Испытания полученного рулонного проката А606 (Cordis) толщиной 4 мм на коррозионную стойкость к водородному растрескиванию

по [10] в сероводородной среде А дали следующие результаты:

- коэффициент длины трещины (CLR) – 0,0 %;
- коэффициент толщины трещины (CTR) – 0,0 %;
- коэффициент чувствительности растрескивания (CSR) – 0,0 %.

В то же время испытания образцов указанного сортамента на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН) методом четырехточечного изгиба показали, что под нагрузкой 350 МПа образцы выдержали испытания в течение 720 ч без разрушения, трещины СКРН выявлены не были.

Другими словами, данный прокат демонстрирует высокую коррозионную стойкость к водородному и сульфидному растрескиванию, поэтому его можно рекомендовать для использования в сероводородных средах. Таким образом, испытания полученного рулонного проката А606 (Cordis) толщиной 4 мм показывают его соответствие

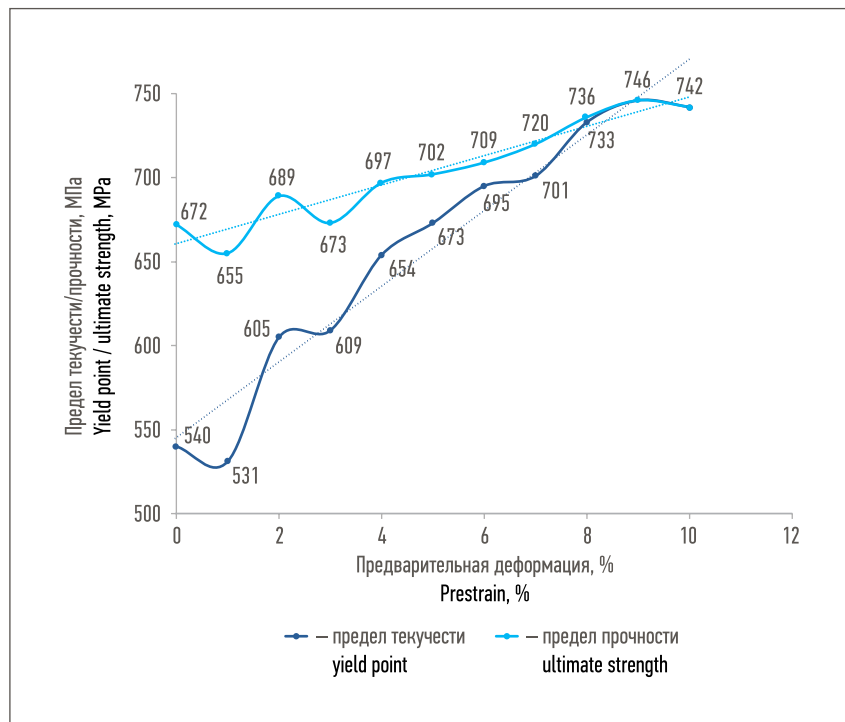


Рис. 2. Характер влияния степени предварительной деформации проката А606 (Cordis) на уровень его прочностных характеристик
Fig. 2. Influence of А606 (Cordis) coiled stock prestrain on its strength properties

действующим требованиям к заготовке для производства колтюбинговых труб.

Одна их важных специальных характеристик проката для изделий указанного типа – характер изменения его прочностных характеристик при наличии предварительной деформации. Это связано со спецификой производства и использования колтюбинговых труб, которые формуются в трубосварочных агрегатах из «бесконечной» полосы и сматываются на барабаны большого диаметра для транспортировки в район скважин. При эксплуатации на нефтепромыслах их разматывают с этих барабанов. Иначе говоря, металл трубы дважды претерпевает холодную деформацию: при ее сгибании в процессе наматывания на барабан и при разгибании в процессе сматывания с него.

Исходя из этого были проведены исследования зависимости изменения прочностных характеристик изготовленного рулонного проката А606 (Cordis) от величины предварительной холодной де-

формации (рис. 2). Полученные данные показывают, что с ростом значений предварительной деформации прочностные характеристики увеличиваются, очевидно, под влиянием наклепа. При этом зона пластичности, которая характеризуется отношением условного предела текучести к пределу прочности, существенно уменьшается при предварительной деформации более 4 %, что необходимо учитывать при выборе диаметра намоточного барабана для конкретных параметров (диаметра и толщины) трубы.

Первые образцы ГНКТ из рулонного проката А606 (Cordis) были изготовлены на ООО «ЭСТМ» в июне 2018 г. Это ГНКТ диаметром 38,1 мм с толщиной стенки 3,4 мм. Полученная труба характеризовалась следующими механическими свойствами (от конца к началу): $\sigma_T = 617\text{--}599$ МПа; $\sigma_B = 634\text{--}649$ МПа; $\delta = 33,6\text{--}34,0$ %. Следует отметить высокую стабильность свойств материала по длине изделия. Размер зерна составляет 12 баллов. Таким образом, указанные

трубы полностью соответствуют нормативам не только группы прочности СТ80 (наиболее востребованной), но и СТ70 и СТ90 согласно действующим требованиям для данного сортамента [9].

Опытно-промышленная партия рулонного проката А606 (Cordis) также была использована для изготовления длиномерных труб в бунтах на АО «Уралтрубмаш». Полученная продукция обеспечивает повышенную коррозионную стойкость, хладостойкость, свариваемость нефтегазопроводных труб, используемых в сложных природных условиях, например в Западной Сибири. В этом регионе состав транспортируемой на нефтепромыслах водонефтяной смеси характеризуется повышенной коррозионной активностью, а ремонт трубопровода сложно провести из-за труднодоступности района. Положительный результат обеспечивается использованием специального микролегирования и технологии сталеплавильного и прокатного производства. Совместными усилиями АО «Уралтрубмаш» и ПАО «Северсталь» был разработан стандарт [11]. Таким образом, подтверждена возможность промышленного производства отечественных колтюбинговых труб из рулонного проката А606 (Cordis), выпускаемого ПАО «Северсталь».

ВЫВОДЫ

Впервые в отечественной практике разработана металлургическая технология производства специального проката для колтюбинговых труб. Изготовлена опытно-промышленная партия проката указанного сортамента, эксплуатационные свойства которой полностью соответствуют требованиям международного (зарубежного) стандарта [9]. Произведенный прокат передан для опробования на отечественных трубных заводах. Кроме того, разработана соответствующая нормативно-техническая документация. Подводя итог, можно говорить об успешном решении

задачи импортозамещения в сфере производства колтюбинговых труб, которые становятся все более востребованными на российском рынке.

Представленные исследования были проведены в рамках комплексного проекта, предусматривающего создание высокотехнологичного производства, по теме «Разработка и освоение наукоемкой технологии производства хладостойкого и коррозионностойкого проката для изготовления прямошовных газонефтепроводных труб в рамках инфраструктурного развития ТЭК РФ с целью импортозамещения» (Постановление Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г., договор №02.G25.31.0141). ■



ЛИТЕРАТУРА

1. Родионова И.Г., Митрофанов А.В., Тихонов С.М. и др. «Северкор» – современный прокат для нефтепромысловых трубопроводов // Инженерная практика. 2017. № 12. С. 38–44.
2. Кичигина Н.А., Комиссаров А.А., Ионов С.М. и др. Промысловые испытания труб из рулонного проката «Северкор» с повышенной коррозионной стойкостью // Инженерная практика. 2020. № 5–6. С. 54–59.
3. Родионова И.Г., Зайцев А.И., Бакланова О.Н. и др. Современные подходы к повышению коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности сталей для нефтепромысловых трубопроводов / под ред. О.Н. Новоселовой. М.: Metallurgizdat. 2012.
4. Зайцев А.И., Крапошин В.С., Родионова И.Г. и др. Комплексные неметаллические включения и свойства стали. М.: Metallurgizdat, 2015.
5. Комиссаров А.А., Соколов П.Ю., Тихонов С.М. и др. Металлофизические особенности производства малоуглеродистого проката для нефтепромысловых труб // Сталь. 2018. № 11. С. 57–62.
6. Серов Г.В., Комиссаров А.А., Тихонов С.М. и др. Влияние раскисления на состав неметаллических включений низколегированной стали // Новые огнеупоры. 2018. № 12. С. 3–8. DOI: 10.17073/1683-4518-2018-12-3-8.
7. Патент № 2675307 Российская Федерация, МПК C21D 8/02 (2006.01), C22C 38/00 (2006.01), B21B 1/26 (2006.01). Способ производства низколегированных рулонных полос с повышенной коррозионной стойкостью: № 2017143876: заявл. 14.12.2017 г.; опубл. 18.12.2018 г. / Митрофанов А.В., Барабошкин К.А., Киселев Д.А. и др.; заявитель ПАО «Северсталь».
8. Патент № 2679375 Российская Федерация, МПК C21C 7/00 (2006.01), C21C 7/10 (2006.01), C22C 38/18 (2006.01). Способ производства низкоуглеродистой стали с повышенной коррозионной стойкостью: № 2017143878: заявл. 14.12.2017 г.; опубл. 07.02.2019 г. / Митрофанов А.В., Барабошкин К.А., Киселев Д.А. и др.; заявитель ПАО «Северсталь».
9. API SPEC 5ST–2010. Specification for Coiled Tubing U.S. Customary and SI Units (first edition: April 2010, effective date: 1 October 2010, reaffirmed: July 2020) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bsbedge.com/productdetails/API/APISPEC5ST/apispec5st> (дата обращения: 20.03.2021).
10. NACE TM0284–2016 Test method. Evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking (approved on 22 March 2016) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://webstore.ansi.org/standards/nace/ansinacetm02842016> (дата обращения: 20.03.2021).
11. СТО Северсталь 00186217–327–2017. Прокат тонколистовой горячекатаный травленный повышенной прочности по ASTM A606 для производства колтюбинговых труб. [Электронный ресурс]. Режим доступа: ограниченный.

REFERENCES

- (1) Rodionova IG, Mitrofanov AV, Tikhonov SM, Sidorova YeS. Severkor: an advanced coiled stock for oilfield pipelines. *Engineering Practice* [Inzhenernaya praktika]. 2017; (12): 38–44. (In Russian)
- (2) Kichigina NA, Komissarov AA, Ionov SM, Tikhonov SM, Mazova YeP, Mishnev PA, et al. Field testing of pipes made of Severkor coiled stock with improved corrosion resistance. *Engineering Practice*. 2020; (5–6): 54–59. (In Russian)
- (3) Novoselova ON (ed.), Rodionova IG, Zaytsev AI, Baklanova ON, Golovanov AV, Endel NI, et al. *Modern Approaches to Improving Corrosion Resistance and Operational Reliability of Oilfield Pipeline Steels*. Moscow: Metallurgizdat; 2012. (In Russian)
- (4) Zaytsev AI, Kraposhin VS, Rodionova IG, Semernin GV, Talis AL. *Complex Nonmetal Inclusions and Properties of Steel*. Moscow: Metallurgizdat; 2015. (In Russian)
- (5) Komissarov AA, Sokolov PY, Tikhonov SM, Sidorova EP, Kuznetsov DV, Mishnev PA, et al. Production of low-carbon steel sheet for oil-industry pipe. *Steel* [Stal']. 2018; (11): 57–62. (In Russian)
- (6) Serov GV, Komissarov AA, Tikhonov SM, Sidorova EP, Kushnerev IV, Mishnev PA, et al. Deoxidizing effect on the low-alloyed steel's nonmetallic inclusion's compositions. *New Refractories* [Novye огнеупоры]. 2018; (12): 3–8. (In Russian)
- (7) Mitrofanov AV, Baraboshkin KA, Kiselev DA, Kuznetsov DV, Tikhonov SM, Serov GV, et al. *Method of manufacture of low-alloyable roll strips with enhanced corrosion resistance*. RU2675307 (Patent) 2017.
- (8) Mitrofanov AV, Baraboshkin KA, Kiselev DA, Mezin FI, Kuznetsov DV, Tikhonov SM, et al. *Method of production of low-carbon steel with improved corrosion stability*. RU2679375 (Patent) 2017.
- (9) API. *API Spec 5ST–2010. Specification for Coiled Tubing U.S. Customary and SI Units (first edition: April 2010, effective date: 1 October 2010, reaffirmed: July 2020)*. Available from: <https://www.bsbedge.com/productdetails/API/APISPEC5ST/apispec5st> [Accessed: 20 March 2021].
- (10) NACE. *NACE TM0284–2016. Test method. Evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking (approved on 22 March 2016)*. Available from: <https://webstore.ansi.org/standards/nace/ansinacetm02842016> [Accessed: 20 March 2021].
- (11) PAO Severstal. *СТО Severstal 00186217–327–2017 (company standard). Hot-rolled etched sheet steel of enhanced strength as per ASTM A606 for coiled tubing production*. [Access restricted].