

УДК: 622.279.5

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНЫХ БЕСШОВНЫХ ТРУБ ДЛЯ ДОБЫЧИ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Ширяев А.Г.¹, генеральный директор

Четвериков С.Г.², управляющий директор

Чикалов С.Г.¹, заместитель генерального директора по техническим продажам и инновациям

Пышминцев И.Ю.³, д.т.н., профессор, генеральный директор (PyshmintsevIU2@tmk-group.com)

Крылов П.В.⁴, начальник департамента

¹ОАО «Трубная металлургическая компания»

(105062, Россия, Москва, ул. Покровка, 40, к. 2а)

²ОАО «Волжский трубный завод»

(404119, Россия, Волгоградская область, Волжский, ул. 7-я Автодорога, 6)

³ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»

(454139, Россия, Челябинск, ул. Новороссийская, 30)

⁴ПАО «Газпром»

(117997, Россия, Москва, ул. Наметкина, 16)

Аннотация. Дан обзор основным направлениям разработки современных трубных сталей, технологии их выплавки, а также горячей прокатки и термообработки для удовлетворения возросших требований к бесшовным трубам для добычи нефти и газа в сложных условиях. Задачи Газпрома в освоении новых ресурсов определили разработку технических требований к высокопрочным хладостойким, сероводородостойким и стойким к углекислотной коррозии обсадным и насосно-компрессорным трубам. Даны металлургические основы разработки новых марок высококачественной стали с минимальным содержанием серы, фосфора, растворенных газов и режимов их обработки, состоящие в выборе химического состава с учетом задачи формирования мартенситной структуры при закалке и последующего высокого отпуска для формирования требуемого сочетания прочности и вязкости. При этом показано, что оптимальная комбинация высокой прочности и вязкости при температуре минус 60 °С может быть достигнута при легировании хромомолибденовой стали с содержанием углерода около 0,25 % (по массе) карбидообразующими элементами ванадием и ниобием. Обеспечение стойкости к сульфидному растрескиванию под напряжением стали данного типа обеспечивается также микролегированием, направленным на измельчение исходного аустенитного зерна, и целевым для каждого уровня прочности содержанием молибдена, определяющим как высокую прокаливаемость, так и замедление разупрочнения при отпуске. Разработаны новые составы коррозионностойких марок стали мартенситного класса с 13 % хрома, обеспечивающие требуемую стойкость к углекислотной коррозии наряду с улучшенной хладостойкостью и повышенной прочностью по сравнению с базовой композицией типа 20Х13. Приведены результаты реконструкции электросталеплавильного и прокатного производства на Волжском трубном заводе, позволившие обеспечить требуемое качество новой продукции от непрерывнолитой стальной заготовки до готовых труб.

Ключевые слова: прочность, хладостойкость, коррозионная стойкость, легирование, микролегирование, непрерывнолитая заготовка, горячая прокатка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-866-875

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении десятилетий для добычи нефти и газа успешно применяли бесшовные обсадные и насосно-компрессорные трубы по стандартам 80 – 90-х годов прошлого века с соответствующим уровнем требований. Необходимые механические свойства обеспечивали для невысоких групп прочности труб в горячекатаном состоянии, а для повышенных – проведение термической или термомеханической обработки было обязательным. Очевидны ограничения базовых требований, применявшихся для труб массового назначения в части металлургического качества, микроструктуры и свойств, которые в соответствии с современными представлениями делают невозможным производство

специальных видов высококачественных труб – высокопрочных, хладостойких, стойких к воздействию сероводорода и углекислого газа, поскольку:

- не определен химический состав стали, за исключением очень высокого предельного содержания вредных примесей серы и фосфора в 0,045 % (по массе);
- не регламентированы способы и ключевые параметры проведения упрочняющей термической обработки, контроль качества ее проведения;
- отсутствуют требования к величине ударной вязкости и хладостойкости, вязкопластические свойства, наряду с минимальным относительным удлинением, подтверждаются только проведением испытания на сплющивание;
- не определены условия обеспечения стойкости к воздействию сероводорода, а также углекислого газа.

Задачи разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов потребовали освоения производства специальных видов нарезных труб. В данной работе¹ изложены основные подходы, использованные для создания нового поколения труб для добычи газа и нефти, а также результаты комплексной реконструкции мощностей для массового производства бесшовных труб, позволяющие обеспечить выполнение современных требований к высокопрочной хладостойкой продукции, стойкой к углекислотной и сероводородной коррозии.

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

Ввиду очевидного отличия рациональных методов упрочнения для различных групп прочности требования к составу сталей, микроструктуре и методам упрочнения должны быть дифференцированы. Относительно невысокая прочность и применение в некритических условиях определяют возможность формирования преимущественно феррито-перлитной микроструктуры при термической обработке или непосредственно после прокатки. Повышенная и высокая прочность (предел текучести более 550–650 МПа) должна достигаться через формирование структуры высокоотпущенного мартенсита. Это при соблюдении ряда условий позволяет обеспечить не только достаточно высокое сопротивление хрупкому разрушению при пониженных температурах, но и стойкость к растрескиванию в средах, содержащих сероводород, которая сильно зависит от уровня прочности, интенсивно снижаясь с ее ростом, что определяет повышенное внимание к чистоте стали по примесям и включениям. Стойкость к другому типичному виду коррозии – углекислотной достигается применением высокохромистых (9 и 13 % Cr) марок стали.

Решение масштабных задач по освоению новых газовых провинций и запасов [1–4] потребовало разработки новых поколений высоконадежных материалов. Для этого, на основании значительного опыта эксплуатации, Газпром разработал новые технические требования к трубам. В результате исследований были выработаны целевые химические составы, параметры микроструктуры и режимы термической обработки для обеспечения комплекса механических и коррозионно-механических свойств нарезных труб в соответствии с техническими требованиями Газпрома, а также в перспективе других ключевых потребителей, ведущих добычу углеводородов в особо сложных условиях.

Хладостойкие стали

Обеспечение хладостойкости высокопрочной стали (предел текучести не менее 758 МПа и $KCV^{-60} \geq$

¹ В работе принимали участие Рекин С.А., Филиппов А.Г., Ерехинский Б.А., Попов К.А.

≥ 70 Дж/см²) в условиях массового производства определяется выбором химического состава для формирования однородной целевой микроструктуры [5, 6]. С учетом большого опыта производства и известных закономерностей были разработаны составы хром-марганец-молибденовых сталей, микролегированных ванадием и ниобием. Это определялось необходимостью обеспечения прокаливаемости для формирования не менее 90–95 % мартенсита в микроструктуре и высокой устойчивости к отпуску, возможностью обеспечения заданной прочности и соблюдения условий «теплой» калибровки и правки непосредственно после отпуска. Комплексное микролегирование было применено для обеспечения прочности и хладостойкости за счет баланса зернограницного и дисперсионного упрочнений (рис. 1, 2).

Исследования показали, что в сталях с 0,24–0,28 % (по массе) углерода увеличение содержания молибдена закономерно повышает прочность во всем интервале температур отпуска, однако это не может надежно обеспечить ее целевые значения в комплексе с ударной вязкостью. Молибден обеспечивает формирование мартенсита при закалке и сдерживает разупрочнение при отпуске. В связи с этим было определено рациональное его содержание ($\approx 0,30$ %). Микролегирование в количестве 0,03–0,04 % (по массе) обеспечивает существенный прирост прочности, причем ниобий обеспечивает после отпуска при 600 °С прирост $\sigma_{0,2}$ и σ_b на 99 и 77 МПа, а ванадий – на 169 и 158 МПа соответственно. Сильные карбидообразующие элементы позволяют не только контролировать прочностные характеристики, но и обеспечивать хладостойкость. Высокое диспер-

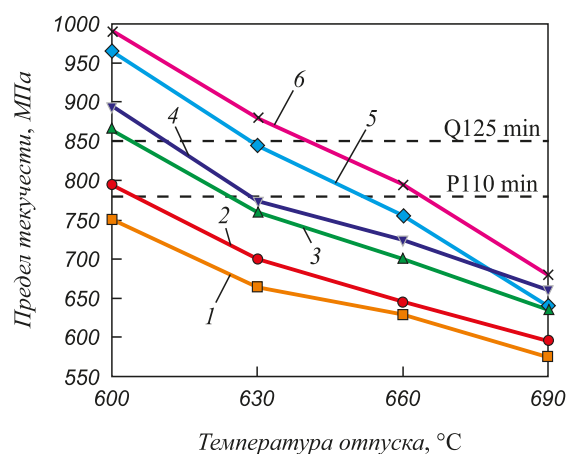


Рис. 1. Влияние температуры отпуска и легирования на предел текучести исследованных трубных сталей:
1 – 0,15 % Mo; 2 – 0,32 % Mo; 3 – 0,53 % Mo;
4 – 0,33 % Mo – 0,033 % Nb; 5 – 0,34 % Mo – 0,038 % V;
6 – 0,31 % Mo – 0,043 % V – 0,032 % Nb

Fig. 1. Influence of tempering temperature and alloying on yield strength of studied pipe steels:
1 – 0.15 % Mo; 2 – 0.32 % Mo; 3 – 0.53 % Mo;
4 – 0.33 % Mo – 0.033 % Nb; 5 – 0.34 % Mo – 0.038 % V;
6 – 0.31 % Mo – 0.043 % V – 0.032 % Nb

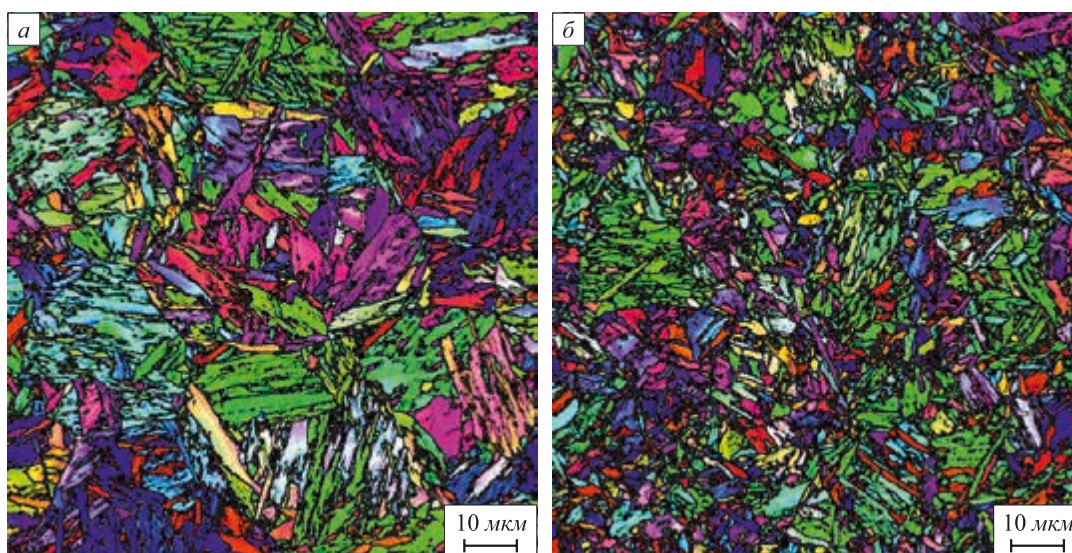


Рис. 2. Микроструктура стали 25ХМФ (а) и 28ХМФВ (б) после закалки и отпуска

Fig. 2. Microstructure of steel grades 25CrMoV (a) and 28CrMoVNb (b) after quenching and tempering

сионное упрочнение при микролегировании ванадием приводит к снижению вязкости и хладостойкости, в то время как ниобий способствует поддержанию оптимального баланса свойств. Это, как показано многочисленными исследованиями, достигается за счет снижения размера аустенитного зерна в стали с ниобием на 1 – 2 балла [7, 8].

Сероводородостойкие стали

Повышение эксплуатационных характеристик в средах с высокой коррозионной активностью становится все более актуальным. В общем случае, растрескивание происходит путем развития трещин вследствие коррозионного воздействия на поверхностные слои и их охрупчивания при насыщении водородом [9, 10]. В сталях для обсадных и насосно-компрессорных труб имеет место сульфидное растрескивание под напряжением (СРН), при котором трещины распространяются от поверхности перпендикулярно приложенной растягивающей нагрузке. Это происходит только при воздействии в течение длительного времени напряжения выше определенного значения, которое является свойством материала [10 – 12]. Характерно, что более прочные материалы особенно склонны к растрескиванию. Это предопределило ограничения применения высокопрочных сталей в средах с влажным сероводородом с одной стороны, и необходимость подбора специальных материалов и способов их упрочнения с другой.

Известны ключевые «металлургические» факторы, определяющие стойкость к растрескиванию в таких так называемых «кислых» средах:

– состав стали, ее номинальный (марочный) состав и фактическое содержание легирующих элементов, примесей и сопутствующих элементов;

– металлургические характеристики, включая уровень прочностных свойств, наличие и состав «вторых» фаз в матрице и на границах зерен, размер зерна, наличие сегрегаций, уровень остаточных напряжений, распределение и плотность дислокаций и др.;

– состояние поверхности, включая наличие дефектов и их глубину.

В ходе работы [13] были сформулированы основные подходы к обеспечению стойкости труб групп прочности С90, Т95 и С110 к СРН, для изготовления которых должна применяться высококачественная мелкозернистая сталь с минимальным содержанием примесей и неметаллических включений (НВ). Базовые требования к свойствам, предельной загрязненности стали труб для «кислых» сред по НВ и другие параметры приведены в СТО ТМК и СТО ГАЗПРОМ и, в общем, сводятся к ограничению максимального балла не более 1,5 по включениям любого типа (фактически не более 0,5 – 1,0) при содержании серы не более 0,005 % (по массе) (фактически 0,002 – 0,003 %).

Разработаны принципы выбора целевого химического состава для различных групп прочности, в том числе с повышенным пороговым напряжением, для которых предел содержания основных легирующих элементов варьируется очень широко, например, по молибдену от 0,25 до 1,00 % (по массе). Это определило проведение исследования влияния легирования, микролегирования на формирование микроструктуры стали и комплекса ее свойств, включая стойкость к деградации прочности в средах, насыщенных сероводородом. Металлографические, электронно-микроскопические и рентгенографические исследования позволили установить роль легирования молибденом для достижения требуемых свойств. Установлено, что необходимость использования молибдена в столь высоких concentra-

циях определяется его сильным влиянием на прокаливаемость и замедление процессов отпуска мартенсита при высоких температурах.

Исследование влияния микроструктурных факторов на сопротивление разрушению позволило сделать вывод о необходимости контроля за формированием дисперсного мартенсита при минимизации структурной полосчатости и получении максимально однородной структуры карбидов средней дисперсности при отпуске. Определены оптимальные диапазоны концентраций Mo, V, Nb для каждой группы прочности, позволяющие обеспечивать достижение заданного предела текучести и, соответственно, порогового напряжения за счет формирования сложных карбидов, главным образом, типа MC и легированного цементита в предельно отпущенной ферритной матрице.

Стали, стойкие к углекислотной коррозии

Разработка ряда новых месторождений осложнена наличием углекислого газа, что определяет высокую скорость коррозии углеродистых и низколегированных сталей. Рациональным способом решения данной проблемы является использование высокохромистых сталей, например, коррозионностойких сталей мартенситного класса, содержащих около 13 % хрома [14 – 17]. Проблемы углекислотной коррозии привели к неуклонному росту производства такой продукции в мире с 80-х годов прошлого века. Сложнолегированные мартенситные, супермартенситные, ферритные, суперферритные, аустенито-ферритные, аустенитные стали, а также сплавы на основе никеля обеспечивают достаточно высокую стойкость труб при высоких температурах, где проблемы коррозионной защиты не могут быть решены за счет полимерных покрытий.

Следует отметить, что марки (группы), включенные, например, в спецификации API 5CT, получили самое широкое распространение, и их доля в нефтяной и газовой промышленности мира составляет около 70 % всех коррозионностойких сталей. Прежде всего, это L80 13Cr, максимально схожая по составу с массовой отечественной маркой 20X13, однако трубы из нее для добычи нефти и газа ранее не производили в РФ ввиду отсутствия спроса (необходимости разработки таких запасов), а точечная потребность удовлетворялась за счет разовых поставок по импорту. Однако специфика применения в РФ при низких температурах в зимнее время не позволяет использовать такие простые композиции ввиду их ограниченной хладостойкости. Применение труб из супермартенситных марок стали с пределом текучести в интервале от 552 до 965 МПа позволяет гарантировать очень высокий уровень ударной вязкости при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже [14, 15]. Однако это приводит к резкому росту затрат ввиду высокого содержания молибдена (1,5 – 3,0 %), никеля (4,5 – 6,5 %) и ультранизкого содержания углерода (не

более 0,03 %). Таким образом, задача состояла в разработке составов и технологии производства труб из высокохромистых марок стали рационального состава, обеспечивающих:

- хладостойкость при широком диапазоне минимальных пределов текучести от 552 до 758 МПа (группы L80 – P110 соответственно);
- возможность массового производства в сталеплавильных цехах;
- конкурентный уровень себестоимости, экономическую целесообразность широкого применения, высокий экспортный потенциал.

Основным направлением для обеспечения высокой прочности и хладостойкости стало снижение содержания углерода и повышение содержания никеля, что в комбинации позволяло сохранить структурный класс стали. Электрохимические и автоклавные исследования подтвердили соответствие предложенных материалов критериям коррозионной стойкости по СТО ГАЗПРОМ 2-4.1-228 в модельной среде со скоростью не выше 0,1 мм в год. При этом наблюдается естественная закономерность повышения стойкости при снижении содержания углерода в разработанных марках (рис. 3).

Обеспечение хладостойкости металла труб в высокопрочных состояниях потребовало особого контроля за формированием микроструктуры на стадии горячей деформации и последующей термической обработки с применением микролегирования ниобием, что улучшило комплекс свойств на 15 – 30 % без значимого роста себестоимости. Проведенные термодинамические расчеты позволили оптимизировать состав и свойства стали для производства труб группы прочности P110

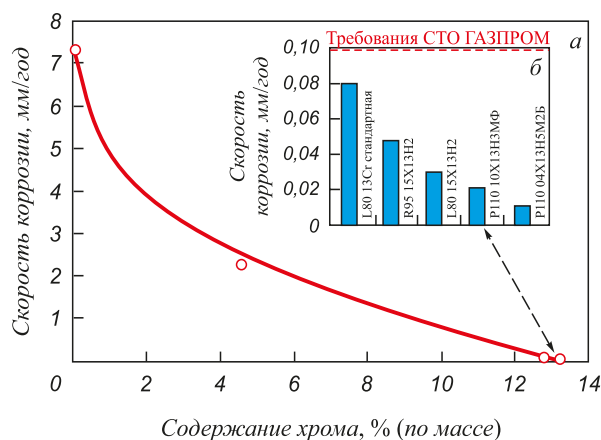


Рис. 3. Влияние состава стали на скорость коррозии хромистых трубных сталей:

- а – 5 % NaCl, $107\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{CO}_2} = 0,1\text{ МПа}$, поток 3,8 м/с;
 б – 5 % NaCl + 0,5 % $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CH}_3\text{COONa}$, pH = 4,0,
 $P_{\text{CO}_2} = 3\text{ МПа}$, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Influence of steel composition on corrosion rate of chromium steels:

- а – 5 % NaCl, $107\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{CO}_2} = 0,1\text{ МПа}$, flow 3.8 m/s;
 б – 5 % NaCl + 0.5 % $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CH}_3\text{COONa}$, pH = 4.0,
 $P_{\text{CO}_2} = 3\text{ МПа}$, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

в хладостойком исполнении за счет управления фазовым составом при температурах горячего прессования.

РАЗВИТИЕ МОЩНОСТЕЙ И ТЕХНОЛОГИЙ

ПРОИЗВОДСТВА

Трубная металлургическая компания (ТМК) была создана в 2001 г., поэтапно объединив четыре крупнейших российских заводов по производству стальных труб различного назначения: Волжский трубный завод (ВТЗ), Северский трубный завод (СТЗ), Синарский трубный завод (СинТЗ), Таганрогский металлургический завод (ТАГМЕТ). Приоритетом развития компании стала реконструкция всего технологического цикла производства бесшовных труб от производства стали до финишных операций для выпуска продукции, соответствующей новому уровню требований [18 – 20]. На начальном этапе основные производственные предприятия ТМК производили (в 2003 г): 1,694 млн т стали, 1,098 тыс. т из которых выплавляли мартеновским способом, а 596 тыс. т стали разливалось непрерывно; 1,678 млн т горячекатаных труб, в том числе 679 тыс. т на трубопрокатных агрегатах (ТПА) с устаревшими пилгримовыми станами.

Задачей стало создание и внедрение комплекса технологий производства высококачественных бесшовных труб, прежде всего, для растущих потребностей топливно-энергетического комплекса, повышения экспортного потенциала и успешной конкуренции с мировыми технологическими лидерами в области высокотехнологичных нарезных труб. Основными технологическими направлениями стали:

- переход на 100 %-ное производство стали электропечным способом, применение внепечной обработки и вакуумирования для обеспечения выпуска высококачественных труб в сероводородостойком, хладостойком исполнениях, а так же стойких к коррозии;

- переход на разливку стали только непрерывным способом с использованием высококачественной непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) непосредственно в ТПА;

- внедрение современных ТПА и технологий прокатки, обеспечивающих повышенный контроль геометрических размеров на 30 – 70 % точнее требований основных стандартов и улучшенным качеством поверхности;

- освоение технологий и оборудования для массового производства новых высокогерметичных резьбовых соединений.

Очевидно, что устаревший способ производства стальной заготовки и труб на СТЗ и ТАГМЕТ определил необходимость их полной замены, главным образом, на основе предложений мировых лидеров металлургического машиностроения. В то же время уникальный собственный опыт производства бесшовных труб из НЛЗ и более совершенное оборудование определило поиск оригинальных технических и технологических

решений для рациональной реконструкции производства на ВТЗ. В 1989 – 1990 гг. на ВТЗ был создан самый современный в СССР комплекс по прокатке стальных труб из НЛЗ собственного производства, приобретенный по решению Совета Министров СССР у компании «Италимпьянти». Тем не менее, и данный комплекс не мог обеспечить технологическое достижение целей ТМК в новых экономических условиях.

Электросталеплавильное производство

В состав электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) ВТЗ входили участки:

- выплавки и внепечной обработки с двумя электродуговыми сталеплавильными печами ДСП емкостью 150 т, двумя установками ковш–печь, вакууматором ковшевого типа;

- непрерывной разливки стали с тремя машинами непрерывного литья заготовок;

- отделки и складирования круглых и квадратных заготовок;

- обжига извести, отделения подготовки сыпучих материалов и ферросплавов, утилизации шламов, газоочистки, переработки сталеплавильных шлаков и др.

Проектная производительность цеха при работе двумя печами составляла 1 млн т НЛЗ в год. Начиная с 1998 г., постоянно работала только одна печь на 480 – 525 тыс. т в год при общей длительности плавки 98 мин, из них под током 71 мин и расходе электроэнергии 500 кВт·ч/т. Разливка стали в НЛЗ квадратного сечения со стороной 240, 300 и 360 мм, а также круглого сечения диаметром от 156 до 410 мм производилась на трех машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) INNSE радиально-криволинейного типа с производительностью по 450 тыс. т в год. Кристаллизаторы длиной 700 мм и малая протяженность зон вторичного охлаждения не обеспечивали нужную производительность, а отсутствие электромагнитного перемешивания (ЭМП) и устаревшая конструкция не позволяли обеспечивать требуемое качество.

Для достижения конкурентоспособной производительности в 1 млн т с одной печи и качества заготовки было решено провести комплексную реконструкцию. Печь была дооснащена современным газокислородным оборудованием, позволяющим работать на вспененных шлаках и использовать альтернативные источники энергии – природный газ и кислород. За счет этого была сокращена длительность плавки до 65 мин, в том числе под током до 47 мин, увеличена производительность до 960 тыс. т в год при снижении расхода электроэнергии до 410 кВт·ч/т (рис. 4).

В ходе исследований была выявлена зависимость качества вакуумной обработки стали от качества скачивания шлака. Улучшение скачивания шлака позволило обеспечить зеркало металла диаметром 0,5 – 1,0 м и достичь стабильного удаления газов до уровня

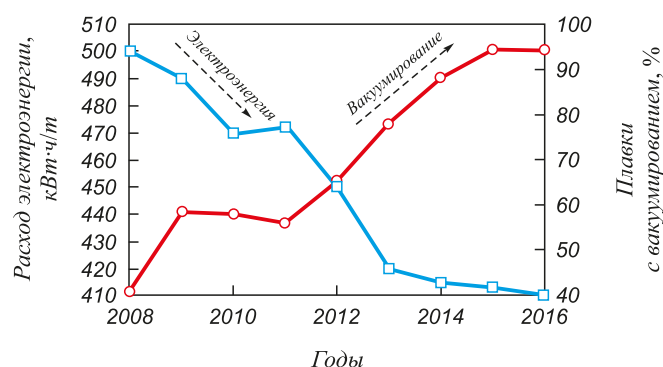


Рис. 4. Изменение удельного расхода электроэнергии при выплавке и доли разливки вакуумированной стали в результате реконструкции ЭСПЦ ВТЗ

Fig. 4. Change of specific electric power consumption for steel production and portion of vacuum treated heats resulted by MSP reconstruction at VTZ

$N_2 \leq 80$ ppm, $H_2 \leq 2$ ppm. Для увеличения доли плавки, подвергаемых вакуумированию, реконструирован агрегат вакуум-кислородного рафинирования, в результате фактическое количество плавки, прошедших вакуумирование, увеличено до 94 %. Реконструкция МНЛЗ-1 и МНЛЗ-3 с установкой новых удлиненных кристаллизаторов, резонансных механизмов качания, ЭМП и т.д. увеличила производительность при минимизации поверхностных дефектов НЛЗ.

Современное оборудование, а так же новая технология позволили получить НЛЗ и трубы высокого качества. Обобщенные показатели качества НЛЗ по показателям целевая продукция и целевая продукция с первого предъявления достигли 99,6 и 96,1 % соответственно. Отбраковка труб по дефектам сталеплавильного происхождения была снижена с 3,5 до 0,4 %. Данные табл. 1 демонстрируют принципиальное улучшение основных показателей качества макроструктуры НЛЗ после реконструкции.

Для уменьшения загрязненности продуктами раскисления, ввиду интенсификации плавки внедрен контроль активности кислорода в металле перед выпуском с ограничением для низкоуглеродистых марок стали до 1000 ppm, а для остального сортамента – до

800 ppm. При выпуске стали из ДСП предусмотрена отдача карбида кремния, что дало ряд преимуществ. С целью обеспечения требований по чистоте металла в процессе внепечной обработки применен восстановительный глиноземсодержащий шлак, что вследствие большей ассимилирующей способности снизило содержание НВ и увеличило скорость десульфурации стали. Разработанная технология производства НЛЗ обеспечила достижение требуемых показателей производительности и качества:

- получение низкого содержания в готовом металле вредных примесей и газов, в том числе: серы не более 0,002 %, фосфора не более 0,010 %, азота не более 0,008 %, кислорода не более 0,0020 %, водорода не более 0,0002 %;

- рациональное комплексное легирование и микролегирование для обеспечения содержания элементов в узких пределах, в том числе: углерода 0,02 – 0,03 %, кремния, марганца, хрома 0,10 – 0,12 %, ванадия, ниобия, алюминия 0,010 %;

- формирование мелких включений предельно низкой бальности.

Освоение производства коррозионностойких марок стали на основе 13Cr выявило проблемы низкого качества поверхности (газовый пузырь) и макроструктуры НЛЗ, что определяло высокий процент отбраковки по внутренним дефектам трубы, неудовлетворительную разливаемость, трудности газокислородной резки (ГКР) и высокий уровень технологической обрезки, для устранения чего были предложены:

- специальные режимы вакуумирования и раскисления с присадкой специальной проволоки с ферротитановым наполнителем для связывания азота из теоретического расчета получения содержания титана 0,025 – 0,030 %;

- новый температурно-скоростной режим и интенсивность охлаждения без увеличения уровня брака по дефекту «кривизна»;

- специальный режим ЭМП металла в кристаллизаторе с противовращением, особая технология и режимы работы машин ГКР.

Новые технологии производства стали на основе 13Cr позволили увеличить производительность, расширить марочник, улучшить качество НЛЗ и освоить производство труб непосредственно из НЛЗ методом прессования. Ниже представлены объемы производства НЛЗ (т) из стали на основе 13 % Cr в ЭСПЦ ВТЗ в период 2011 – 2017 гг., за который в результате проведенных НИР средние показатели макроструктуры НЛЗ были заметно повышены:

Таблица 1

Показатели качества макроструктуры НЛЗ до и после реконструкции

Table 1. Parameters of continuously cast billet macrostructure before and after reconstruction

Показатель	ЦП	ОЛ	ЛПТ общ.	ЛПТ осев.	КТЗ
До реконструкции, балл	2,5	1,4	0,5	1,6	0,2
После реконструкции, балл	1,1	0,9	0	0,7	0

2011	2012	2013	2014
264,85	1573,55	1810,657	1437,06
2015	2016	2017	Всего
3897,3	2623,55	2316,1	13 923,09

Трубопрокатное производство

Технические решения, заложенные в ТПА 159-426 ТПЦ-3 ВТЗ с непрерывным двухвалковым семиклетьевым станом для раскатки с удержанием длинной оправки, были на момент пуска несомненно прогрессивными. Однако эксплуатация и развитие технологий выявили ряд существенных недостатков:

- неравномерная структура заготовок в связи с неравномерностью кристаллизации квадратной заготовки, периодическое получение плен и лампасов по наружной поверхности задних концов стаканов при закате граней блюма;

- повышенный эксцентриситет задних концов стаканов с пресс-прошивного стана и, как следствие, значительная технологическая обрезь;

- большое количество операций и номенклатура технологического инструмента и, как следствие, большое время цикла, остывание заготовки.

Модернизация участка горячего проката, обеспечивающая переход на прямую прошивку в косовальковом стане, потребовала обновления систем управления, автоматизации и контроля, установки более мощных приводов на прошивной стан (элонгатор), замены его входной выходной стороны, установки системы для проведения горячих измерений прокатываемых труб и др. Новая схема производства труб позволила сократить количество операций, время цикла и энергозатраты. Соответственно были значительно увеличены объемы производства (табл. 2) и производительность труда. В частности, достигнуто сокращение времени цикла с 323 до 271 с, существенно повышена точность проката. Фактическое поле допуска по толщине стенки было сужено с 22,5 до 18 % на трубах с толщиной стенки свыше 25 мм.

Таблица 2

Прирост объемов проката труб в ТПЦ-3 ВТЗ после модернизации

Table 2. The increase of rolled pipes in pipe rolling shop No. 3 of VTZ after modernization

Год	Объем производства в месяц, т			Всего за год
	минимальный	максимальный	средний	
2009	14 757	34 801	22 615	271 379
2010	6734	34 138	23 572	282 866
2011	22 441	39 266	32 033	384 394
2012	31 940	48 356	39 881	478 570
2013	30 260	49 018	40 041	480 497
2014	44 704	52 147	49 647	595 759
2015	26 766	51 932	42 623	511 481
2016	32 980	50 867	40 789	489 471

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ И ОСВОЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ

Результаты разработки и внедрения современных технологий производства стали и высококачественных горячекатаных труб позволили сформулировать и решить задачи коренного изменения технологий производства бесшовных труб в ТМК. Переход на непрерывную разливку стали, прошедшей внепечную обработку в установках ковш–печь, был полностью завершён уже к 2007 г., а производство стали в мартеновских печах было окончательно остановлено в 2013 г. с пуском ДСП на ТАГМЕТ (рис. 5). Технологии производства труб на всех существующих ТПА и прессовых линиях были полностью адаптированы для использования НЛЗ, которая стала основным исходным материалом. Исключения составляют малые партии продукции специальной металлургии и заготовка малого диаметра 120 мм, непрерывная разливка которой закрытой струей нецелесообразна. Высококачественная НЛЗ стала основой эффективного производства труб на ТПА нового поколения с пятиклетевыми раскатными станами новой конструкции с трехвалковыми клетями типа Premium Quality Finishing (PQF) и Fine Quality Mill (FQM) на ТАГМЕТ и СТЗ. Новая сквозная технология стала основой неуклонного роста объемов производства, прерывавшегося только кризисными явлениями, перехода на новый уровень качества стали и труб в условиях массового производства и значительного снижения удельного негативного воздействия на окружающую среду. Производительность труда была повышена в сталеплавильном производстве более чем в 2,5 раза, а в трубопрокатном более чем в 2,9 раза.

Задача обеспечения основных потребителей высококачественными трубами и решение задач импортозамещения потребовала внедрения новых средств термического упрочнения, а также современных линий финишной отделки. Суммарные новые мощности по термической обработке для осуществления операций закалки и отпуска с возможностью достижения высокопрочных и хладостойких состояний достигли более 1 млн т в год. Одной из важнейшей финишных операций при изготовлении Oil Country Tubular Goods (OCTG) является нарезка резьбы. Тенденция последних лет – это развивающийся спрос на газогерметичные резьбовые соединения класса Премиум, использование которых эффективно для реализации технологий направленного и горизонтального бурения, разработки трудноизвлекаемых и нетрадиционных запасов углеводородов [21]. На протяжении ряда лет в ТМК разработана линейка безмуфтовых и муфтовых соединений с прочностью до 100 % от напряжения текучести тела трубы, которые успешно прошли испытания по международным стандартам в российских и зарубежных лабораториях. Результатом разработки и освоения производства высокотехнологичных хладостойких

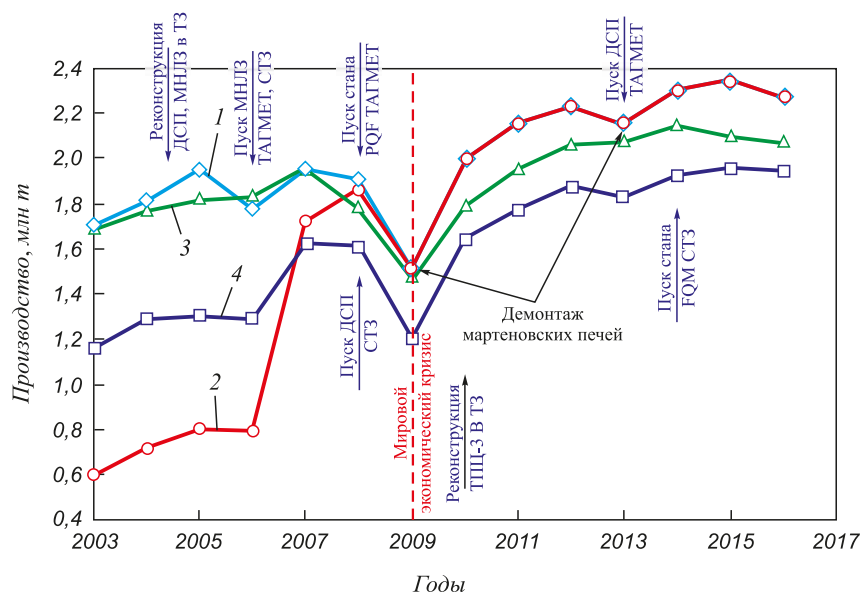


Рис. 5. Внедрение новой технологии производства стальных горячекатаных труб в Российском дивизионе группы ТМК:
1 – сталь; 2 – НЛЗ; 3 – трубы бесшовные, всего; 4 – трубы из стали ТМК

Fig. 5. Implementation of new technology for production of steel hot rolled pipes in Russian division of TMK group :
1 – steel; 2 – continuously cast billet; 3 – seamless tubes, total; 4 – tubes from TMK steel

и сероводородостойких OCTG с премиальными соединениями стало эффективное применение продукции в нефтяных и газовых компаниях России и за рубежом (табл. 3).

Выводы

В короткий исторический период за 10 – 15 лет произошли коренные изменения в технологии изготовления насосно-компрессорных и обсадных труб для добычи нефти и газа. Это заключалось в переходе к массовому производству высокопрочных, хладостойких и специальных труб из легированных и микрولةгированных марок стали. В условиях трубных заводов осуществлен окончательный переход к выплавке высококачественной

стали в электропечах, непрерывной разливке и массовому производству бесшовных труб на станках нового поколения непосредственно из непрерывнолитой заготовки. Новые марки стали, применение современных средств термообработки и новые конструкции резьбовых соединений позволили обеспечить уникально высокий комплекс свойств продукции, которая находит устойчивый спрос для реализации современных технологий добычи нефти и газа в России и за рубежом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Люгай Д.В., Скоробогатов В.А. Концептуальные основы стратегии развития минерально-сырьевой базы газовой промышленности России и ПАО «Газпром» до 2050 г. // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2016. № 1 (25). С. 4 – 15.
2. Маркелов В.А., Черепанов В.В., Филиппов А.Г. и др. Обоснование стратегии освоения ачимовских отложений Уренгойского месторождения // Газовая промышленность. 2016. № 1 (733). С. 40 – 45.
3. Сулейманов Р.С., Маринин В.И. Развитие ресурсной базы ООО «Газпром добыча Уренгой» // Газовая промышленность. 2008. № 8. С. 10 – 13.
4. Люгай Д.В. Особенности освоения и проектирования разработки Чаяндинского НГКМ // Газовая промышленность. 2010. № 14. С. 56 – 58.
5. Штремель М.А. Разрушение. – В 2-х кн., кн. 2. Разрушение структур. – М.: ИД МИСиС, 2015. – 976 с.
6. Krauss G. Martensite in steel: strength and structure // Materials Science and Engineering: A. 15 Dec. 1999. Vol. 273–275. P. 40 – 57.
7. De Ardo A.J. Fundamental metallurgy of niobium in steel // International Symposium Niobium 2001. AIME-TMS. Orlando, FL. 2002. P. 427 – 500.
8. Усков Д.П., Пышминцев И.Ю., Мальцева А.Н. и др. Влияние легирования на свойства высокоотпущенных сталей, применяемых для производства обсадных труб // Вестник ЮУрГУ. Металлургия. 2017. Т. 17. № 2. С. 41 – 46.

Таблица 3

Доля ТМК на рынке бесшовных труб OCTG

Table 3. Share of TMK seamless tubes at OCTG market

Показатель	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
OCTG с соединениями класса Премиум							
Внутренний рынок	70	51	46	58	73	77	79
Мировой рынок	11	10	9	10	11	10	11
Внутренний рынок бесшовных OCTG, %							
ТМК	61	63	58	61	65	68	65
Импорт	24	19	26	23	9	10	10
Прочие	15	18	16	17	26	22	25

9. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
10. Lynch S.P. Hydrogen effects in Metals /A.W.Thompson, I.M. Bernstein eds. The Metallurgical Society, 1981. P. 863.
11. Fowler C. NACE MR0175. Does it work for you? // Proceedings of Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar. CBMM-TMS. 2012. P. 27 – 34.
12. Elboudjani M. Hydrogen – Induced Cracking and Sulfide Stress Cracking. Uhlig's Corrosion Handbook. Revie R.W. ed. NY: Wiley, 2011. P. 183 – 194.
13. Ерехинский Б.А., Чернухин В.И., Арабей А.Б. и др. Разработка отечественных высокопрочных труб нефтяного сортамента, стойких в средах, содержащих сероводород // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 4. С. 40 – 46.
14. Mitsuo K., Takanori T., Ken S. High Cr stainless steel OCTG with strength and superior corrosion resistance// JFE Giho. 2005. No. 9. P. 7 – 12.
15. Gooch T.G. Heat treatment of welded 13 % Cr – 4 % Ni martensitic stainless steels for sour service // Supplement to the Welding Journal. July 1995. P. 213 – 223.
16. Soares R.B., Lins V.F.C. Corrosion resistance of rolled and rerolled super martensitic steel in media containing chlorides and hydrogen sulfide // Revista Materia. 2017. Vol. 22. No. 4.
17. Битюков С.М., Лаев К.А., Мушина О.В. и др. Повышение характеристик хладостойкости трубных сталей с 13 % Cr группы прочности 80 ksi // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2010. № 12 (1332). С. 58 – 62.
18. Клачков А.А. Комплексное развитие мощностей для производства труб нефтяного сортамента // Сталь. 2009. № 11. С. 59 – 62.
19. Клачков А.А., Красильников В.О., Лубе И.И. и др. Реконструкция сталеплавильного комплекса ОАО ТМК // Сталь. 2006. № 5. С. 95 – 98.
20. Клачков А.А. Модернизация производства высококачественных бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2011. № 4. С. 42 – 43.
21. Емельянов А.В., Щербаков Б.Ю., Рекин С.А. и др. Современные технологии крепления горизонтальных скважин // Газовая промышленность. 2006. № 11. С. 76 – 78.

Поступила 27 декабря 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 11, pp. 866–875.

MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF STEEL SEAMLESS TUBES FOR PRODUCTION OF HARD-TO-RECOVER HYDROCARBONS

**A.G. Shiryayev¹, S.G. Chetverikov², S.G. Chikalov¹,
I.Yu. Pyshmintsev³, P.V. Krylov⁴**

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-866-875

REFERENCES

- ¹JSC “TMK”, Moscow, Russia
 - ²JSC “Volzhskii Pipe Plant” (VTZ), Volzhskii, Volgograd Region, Russia
 - ³Russian Scientific Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk, Russia
 - ⁴PJSC “Gazprom”, Moscow, Russia
- Abstract.** The review contains main directions in the development of modern steelmaking, hot rolling technologies and heat treatment aimed to follow increased requirements to seamless tubes for production of oil and gas under severe conditions. New targets of PJSC “Gazprom” in development of new resources have determined new technical requirements to pipes for low temperature application, resistant to hydrogen sulfide and carbon dioxide corrosion. Basic metal science approaches are given to develop new chemical compositions of high quality steels containing minimum of sulfur, phosphorus and solute gases. Corresponding heat treatment routes are determined for formation of martensitic microstructure in full wall section during quenching with subsequent high tempering for required combination of high strength and ductility. It was shown that optimal combination of high strength and toughness at 60 °C below zero can be achieved by alloying of chromium-molybdenum steel containing about 0.25 wt. % of carbon with strong carbon forming elements such as vanadium and niobium. Sustainability of these steels to stress sulfide cracking was achieved through grain refinement with microalloying by molybdenum in concentrations corresponding to strength grades that gives high hardenability and retards tempering of martensite. New compositions of corrosion resistant martensitic 13 % chromium steel were carried out that was resulted in required resistance to carbon dioxide environments with improved low temperature toughness and high strength. The authors present results of reconstruction of steel making and hot rolling production lines at JSC “Volzhskii Pipe Plant” providing the required quality of new products from continuously cast steel billets to finished tubes.
- Keywords:** strength, resistance to low temperatures, corrosion resistance, alloying, microalloying, continuously cast billets, hot rolling.
1. Lyugai D.V., Skorobogatov V.A. Conceptual basics of development strategy for mineral and raw material base of Russian gas industry and PJSC “Gazprom” till 2050. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoi nauki*. 2016, no. 1 (25), pp. 4–15. (In Russ.).
 2. Markelov V.A., Cherepanov V.V., Filippov A.G., Akhmedsadin S.K., Kalinkin A.V., Kobylkin D.N., Koryakin A.Yu., Neudakhin A.Yu., Skrylev S.A., Nesterenko A.N. Fundamentals of development strategy for Achimov deposits at Urengoy gas fields. *Gazovaya promyshlennost'*. 2016, no. 1 (733), pp. 40–45. (In Russ.).
 3. Suleimanov R.S., Marinin V.I. Development of resource base of “Gazprom dobycha Urengoy” LTD. *Gazovaya promyshlennost'*. 2008, no. 8, pp. 10–13. (In Russ.).
 4. Lyugai D.V. Features of development and design for Chayandinskii NGKM. *Gazovaya promyshlennost'*. 2010, no. 14, pp. 56–58. (In Russ.).
 5. Shtremel' M.A. *Razrushenie: v 2 kn., kn.2. Razrushenie struktur* [Fracture: in 2 books, book 2. Fracture of microstructure]. Moscow: ID MISiS, 2015, 976 p. (In Russ.).
 6. Krauss G. Martensite in steel: strength and structure. *Materials Science and Engineering: A*. 15 Dec. 1999, vol. 273–275, pp. 40–57.
 7. De Ardo A.J. Fundamental metallurgy of niobium in steel. *International Symposium Niobium 2001*, AIME-TMS, Orlando, FL, 2002, pp. 427–500.
 8. Uskov D.P., Pyshmintsev I.Yu., Mal'tseva A.N. etc. Influence of alloying on properties of high strength steels in high tempered state applied for production of casing tubes. *Vestnik YuUrGU. “Metal-lurgiya”*. 2017, vol. 17, no. 2, pp. 41–46. (In Russ.).
 9. Steklov O.I. *Stoikost' materialov i konstruktsov k korrozii pod napryazheniem* [Sustainability of materials and constructions to stress corrosion]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 384 p. (In Russ.).
 10. Lynch S.P. *Hydrogen effects in Metals*. Thompson A.W., Bernstein I.M. eds. The Metallurgical Society, 1981, p. 863.
 11. Fowler S. NACE MR0175. Does it work for you? In: *Proceedings of Microalloyed Steels for Sour Service International Seminar. CBMM-TMS*, 2012, pp. 27–34.

12. Elboudjiani M. *Hydrogen – Induced Cracking and Sulfide Stress Cracking*. Uhlig's Corrosion Handbook. Revie R.W. ed. NY: Wiley, 2011, pp. 183–194.
13. Erekhinskii B.A., Chernukhin V.I., Arabei A.B., Pyshmintsev I.Yu., Veselov I.N., Shiryayev A.G. Development of high strength tubes for special application in oil and gas industry resistant in environments containing hydrogen sulfide. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*. 2016, no. 4, pp. 40–46. (In Russ.).
14. Mitsuo K., Takanori T., Ken S. High Cr stainless steel OCTG with strength and superior corrosion resistance. *JFE Giho*. 2005, no. 9, pp. 7–12.
15. Gooch T.G. Heat treatment of welded 13 % Cr – 4 % Ni martensitic stainless steels for sour service. *Supplement to the Welding Journal*. July 1995, pp. 213–223.
16. Soares R.B., Lins V.F.C. Corrosion resistance of rolled and rerolled super martensitic steel in media containing chlorides and hydrogen sulfide. *Revista Materia*. 2017, vol. 22, no. 4.
17. Bityukov S.M., Laev K.A., Mushina O.V., Leffler M.N., Zhukova S.Yu., Kocheshkova E.V. Improvement of low temperature behavior of 80 ksi grade pipe steel with of 13 % Cr. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2010, no. 12 (1332), pp. 58–62. (In Russ.).
18. Klachkov A.A. Expanding capacity for the production of oil-industry pipe. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1018–1020.
19. Klachkov A.A., Krasil'nikov V.O., Lube I.I., Zuev M.V., Mul'chin V.V. Reconstruction of steel casting shop of JSC TMK. *Stal'*. 2006, no. 5, pp. 95–98. (In Russ.).
20. Klachkov A.A. Modernizing the production of high-quality seamless pipe from continuous-cast blanks. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 4, pp. 338–339.
21. Emel'yanov A.V., Shcherbakov B.Yu., Rekin S.A., Chernukhin V.I., Chernyshev Yu.D., Matveev A.B. Modern technologies of horizontal well casing. *Gazovaya promyshlennost'*. 2006, no. 11, pp. 76–78. (In Russ.).

Information about the authors:

A.G. Shiryayev, General Director

S.G. Chetverikov, Managing Director

S.G. Chikalov, Deputy General Director of Technical Sales and Innovation

I.Yu. Pyshmintsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor; General Director
(PyshmintseviU2@tmk-group.com)

P.V. Krylov, Head of the Department

Received December 27, 2017