

УДК 621.774

Освоение производства труб большого диаметра класса прочности K80 (X100) в России

М.Ю. Недзвецкий^{1,2}, А.Б. Арабей^{2*}, К.Ю. Ментюков², М.С. Сахаров³, А.И. Смелов⁴, П.П. Степанов⁵, Д.А. Рингинен⁵, А.Б. Гизатуллин⁶, С.В. Шандер⁶

¹ ПАО «Газпром», Российская Федерация, 190900, г. Санкт-Петербург, BOX 1255

² ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

³ АО «Северсталь Менеджмент», Российская Федерация, 127299, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 2

⁴ АО «ИТЗ», Российская Федерация, 196655, г. Санкт-Петербург, Колпино,

Территория Ижорский з-д, д. 90, лит. Д, помещение 1-Н

⁵ АО «ВМЗ», Российская Федерация, 607060, Нижегородская обл., г. Выкса, ул. Бр. Баташевых, д. 45

⁶ ПАО «ЧТПЗ», Российская Федерация, 454129, Челябинская обл., г. Челябинск,

ул. Машиностроителей, д. 21

* E-mail: a.b.arabey@gmail.com

Ключевые слова: трубы большого диаметра, категория прочности X100, класс прочности K80, механические свойства.

Тезисы. ПАО «Газпром», ООО «Газпром ВНИИГАЗ» совместно с тремя ведущими российскими металлургическими предприятиями выполнили первый этап работ по оценке технической возможности производства труб класса прочности K80 (X100). Представлен анализ результатов испытаний труб опытных партий, показана выполнимость многих из выдвинутых требований к трубам большого диаметра класса прочности K80.

Мировой опыт свидетельствует о неуклонном интересе ведущих зарубежных операторов к освоению проектов сухопутных газопроводов, рассчитанных на давление более 11,8 МПа, для которых экономическая целесообразность диктует переход на применение сверхвысокопрочных сталей (X100...X120). Концепция строительства газопроводов высокого давления из труб класса прочности K80 (аналог категории прочности X100) имеет особую привлекательность для России с учетом специфики расположения регионов добычи газа и экстремальности природно-климатических условий этих территорий.

Преимущества сооружения магистральных газопроводов из высокопрочных сталей хорошо известны [1–4]. Применение труб класса прочности K80 (X100) дает возможности:

- повысить производительность газопровода за счет транспортировки газа при сверхвысоком рабочем давлении;
- снизить металлоемкость сооружаемых газопроводов ориентировочно до 9 % за счет уменьшения толщины стенки труб;
- снизить расход материалов при сварочно-монтажных работах ориентировочно до 12 %;
- уменьшить стоимость материалов, транспортных расходов, сократить сроки строительства;
- снизить капитальные и операционные расходы построенных газопроводов за счет возможности оптимизации шага расстановки (уменьшения количества) компрессорных станций.

В настоящее время в мировой практике при строительстве магистральных газопроводов наиболее широко используют трубы категории прочности X70. В последнее десятилетие появились примеры успешного применения труб категории прочности X80 [3–4]. Следует отметить, что требования к трубам категории прочности X80, формировавшиеся в течение длительного времени по мере совершенствования процесса производства проката и труб, в итоге были включены в авторитетные мировые стандарты, такие как API 5L, ISO 3183, CSA Z245.1 и DNV OS-F101. Первые

требования к трубам категории прочности выше X80 появляются только в 1990-х гг. в ходе реализации зарубежных исследовательских проектов (рис. 1), и только с марта 2007 г. они публикуются в стандарте ISO 3183 (табл. 1).

Основные требования к механическим свойствам высокопрочных трубных сталей включают: показатели прочности (пределы прочности и текучести), получаемые в ходе испытаний на растяжение (определяются на 2-дюймовых образцах согласно ASTM A370); показатели вязкости, получаемые в ходе испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным надрезом; показатели сопротивления протяженному разрушению, получаемые в ходе испытаний на ударный изгиб падающим грузом; а также требования к свойствам сварного соединения. Кроме того, в стандарте ISO 3183 с целью обеспечения свариваемости стали сформулированы ограничения по ее химическому составу. Применительно к условиям эксплуатации конкретного проекта стандарт предусматривает возможность введения дополнительных требований, регламентируемых дополнительными спецификациями.

В последние годы рядом ведущих российских трубных компаний выполняются

работы по освоению производства труб класса прочности K80 для перспективных проектов ПАО «Газпром» [6, 7]. Опираясь на мировой опыт и достигнутый на сегодня уровень металлургического и трубного производств, специалисты ООО «Газпром ВНИИГАЗ» сформулировали исходные технические требования к опытным партиям труб класса прочности K80:

- номинальный диаметр – 1220 мм;
- толщина стенки – 20 мм;
- рабочее давление труб класса прочности K80 – 14,8 МПа;
- рабочее давление труб категории прочности X100 – 14,2 МПа;
- минимальная температура стенки труб при полигонных испытаниях – минус 20 °С.

Требования к механическим свойствам основного металла труб приведены в табл. 2.

Наглядное представление о соответствии фактических свойств опытных труб целевым показателям технических требований дают гистограммы распределения значений механических характеристик труб, построенные посредством обобщения результатов испытаний, проведенных на АО «ВМЗ», ПАО «ЧТПЗ» и АО «ИТЗ». Механические испытания на одноосное растяжение основного

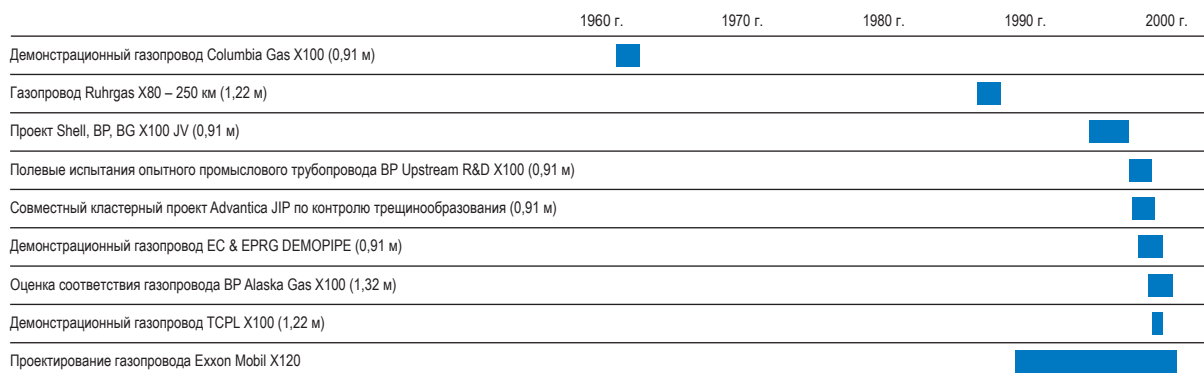


Рис. 1. История разработки требований к трубам категорий прочности X80...X120 [5]: проекты, в ходе которых отработывались требования и сама возможность применения соответствующих труб (в скобках указан диаметр используемых труб)

Таблица 1

Требования стандарта ISO 3183:2012* к механическим свойствам труб класса прочности X100

Тело трубы					Сварной шов	
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$ максимум	Относительное удлинение** δ_2 %, минимум	Работа удара KV, Дж, минимум, для диаметра 1219...1422 мм	σ_B , МПа	KV, Дж
690...840	760...990	0,97	17	68	760	50

* См. ISO 3183:2012. Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation systems.

** Индекс «2» означает, что удлинение определяется на 2-дюймовых образцах по стандарту ASTM 370.

Таблица 2

**Требования к механическим свойствам основного металла труб
классов прочности К80 и Х100, разработанные в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»**

Класс (категория) прочности	Направление вырезки образцов	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, не более	Относительное удлинение после разрыва δ_5 , %, не менее
К80	Поперечное	690...840	790...910	0,95	14,0
	Продольное	630...840	755...910	0,95	14,0
Х100	Поперечное	690...840	760...910	0,95	14,0
	Продольное	630...840	725...910	0,95	14,0

металла труб проводили при температуре 20 °С на плоских 5-кратных образцах типа I¹, вырезанных в поперечном направлении относительно оси трубы (рис. 2).

Как следует из представленных гистограмм, бóльшая часть экспериментально полученных значений σ_B и $\sigma_{0,2}$ укладывается в требуемые интервалы. В то же время не все значения δ_5 подтверждают нормативный уровень данного параметра.

Для высокопрочных труб ввиду повышенного риска протяженных разрушений особую важность представляют результаты испытаний по определению вязкостных свойств металла. С учетом корреляционных зависимостей между фактическими значениями ударной вязкости и остановкой динамической трещины, полученных ранее в ходе полигонных пневматических испытаний труб класса прочности К65, минимальные значения ударной вязкости (КСВ) для основного металла труб класса прочности К80 были приняты на уровне 320 Дж/см² при температуре испытания минус 20 °С и 250 Дж/см² при температуре испытания минус 40 °С. Для сварного шва минимальные значения КСВ установлены на уровне 80 Дж/см² при температуре испытания минус 20 °С (аналогичное требование для температуры минус 40 °С является факультативным).

Испытания основного металла на ударный изгиб (рис. 3) проводили на поперечных образцах² Шарпи типа 11, сварного соединения (рис. 4) – на образцах с надрезом по центру шва (МШ) и по линии сплавления 50 % + 50 % (ЛС).

Исходя из построенных переходных кривых для основного металла (см. рис. 3) можно

сделать вывод, что целевые требования к КСВ труб класса прочности К80 являются достижимыми. Доля вязкой составляющей в изломе образцов при испытаниях падающим грузом установлена на уровне 85 %. Количество вязкой составляющей в изломе образцов основного металла труб было определено по ГОСТ 30456³ на полнотолщинных образцах в диапазоне температур от плюс 20 до минус 70 °С на двух заводах. Результаты испытаний падающим грузом приведены на рис. 5.

Количество вязкой составляющей в изломе образцов основного металла труб при температуре испытаний минус 20 °С в целом соответствует заявленным целевым требованиям. Примечательно, что по мере понижения температуры испытаний за пределы значения минус 20 °С наблюдается монотонное – без резкого падения – снижение количества вязкой составляющей в изломе образцов.

В настоящей работе представлен анализ только части полученных в ходе исследования результатов испытаний. Тем не менее даже приведенных данных достаточно, чтобы прийти к заключению: имеющийся на сегодня уровень металлургического, прокатного и трубного производств позволяет достичь целевых требований, предъявляемых к трубам класса прочности К80.

В то же время очевидным представляется вывод о необходимости дальнейшего совершенствования химического состава стали и технологий ее прокатки, направленных на обеспечение стабильности получаемых механических характеристик труб. Следует оценить целесообразность внедрения результатов работ, которыми установлены негативное влияние кремния и азота на служебные характеристики высокопрочных

¹ См. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями № 1, 2, 3).

² См. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах (с Изменениями № 1, 2).

³ ГОСТ 30456-97 Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб.

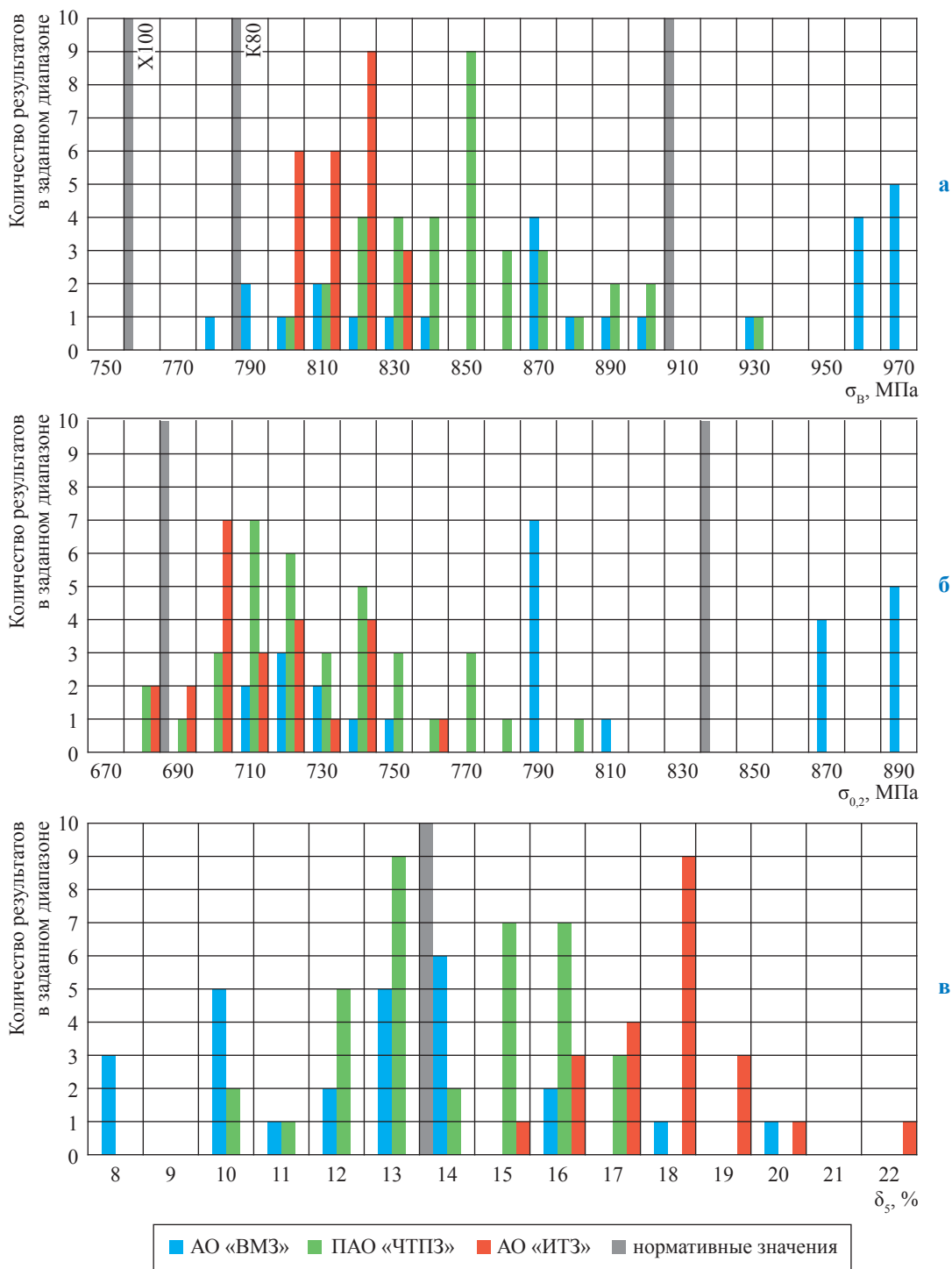


Рис. 2. Результаты механических испытаний основного металла труб в поперечном направлении: а – временное сопротивление; б – предел текучести; в – относительное удлинение

трубных сталей [8, 10], а также повышение вязко-пластических характеристик металла труб, микролегированного медью [11]. К числу вопросов, требующих обстоятельного изучения, необходимо отнести обоснование приемлемого и при этом достижимого уровня относительного общего и равномерного удлинения.

Повышенного внимания, очевидно, заслуживает также и дальнейший поиск оптимальной технологии заводской сварки труб данного класса прочности.

Окончательно сформировать технические требования к трубам класса прочности К80 (Х100) станет возможным только после

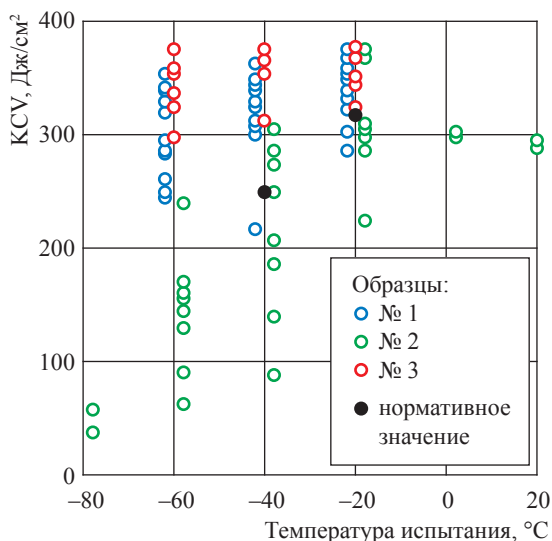


Рис. 3. Результаты испытаний ударной вязкости основного металла труб класса прочности К80

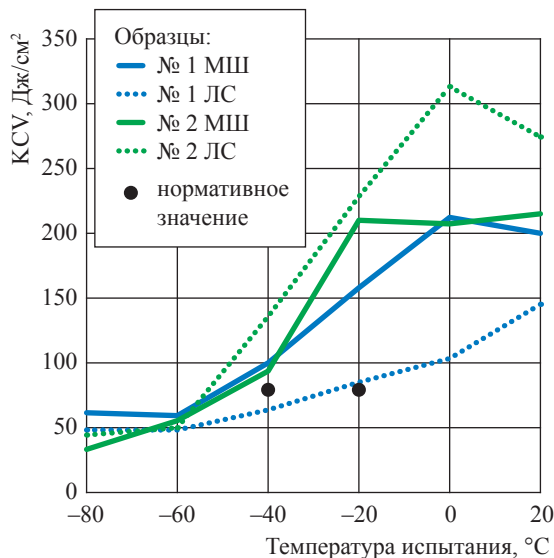


Рис. 4. Результаты испытаний ударной вязкости сварного соединения труб класса прочности К80

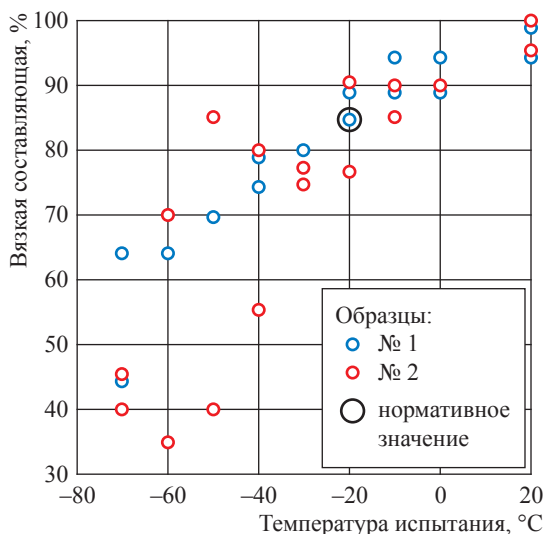


Рис. 5. Количество вязкой составляющей в изломе образца IIIГ

полного цикла экспериментальных исследований, включающих комплекс лабораторных испытаний образцов металла и сварных соединений труб, гидравлических и пневматических испытаний опытных труб, а также исследования возможности изготовления отводов холодного гнущего и оценки свариваемости опытных труб в полевых условиях.

Список литературы

1. Millwood N. Design and construction of pipelines in ultra-high-strength linepipe / N. Millwood, N. Sanderson, J. Hammond // Pipe & Pipelines International. – 2001. – Март-апрель. – С. 17–23.
2. Zhou J. Application of high-grade steels to onshore natural gas pipelines using reliability-based design method / J. Zhou, B. Rothwell, W. Zhou, et al. // 2006 International Pipeline Conference, September 25–29. – Calgary, Alberta, Canada, 2006. – С. 101–110.
3. Степанов П.П. Разработка и внедрение в производство труб категории прочности X80, изготовленных в условиях ОАО «ВМЗ», для сооружения магистрального газопровода «Бованенково – Ухта» и перспективы разработки высокопрочных труб для объектов ОАО «Газпром» / П.П. Степанов, С.А. Гришин, А.А. Кузьмин и др. // Наука и техника в газовой промышленности. – 2011. – № 4 (48). – С. 12–16.

4. Asahi H. Development and commercialization of high-strength linepipe / H. Asahi, T. Hara, E. Tsuru, et al. // *The Journal of Pipeline Engineering*. – 2010. – 1-й квартал. – С. 5–18.
5. Hammond J. Development of standards and specifications for high strength line pipe / J. Hammond // *International Symposium on Microalloyed Steels for the Oil and Gas Industry*. – Araxa, MG, Brazil: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2007. – С. 43–63.
6. Морозов Ю.Д. Структура и свойства штрипса для труб большого диаметра из стали категории прочности X80 – X100 / Ю.Д. Морозов, А.М. Корчагин, В.В. Орлов и др. // *Металлург*. – 2009. – № 3. – С. 43–49.
7. Рингинен Д.А. Изучение свариваемости стали класса прочности X100 / Д.А. Рингинен, А.В. Частихин, Г.Е. Хадеев и др. // *Металлург*. – 2013. – № 12. – С. 68–74.
8. Глебов А.Г. Роль кремния в формировании макро- и микроструктуры высокопрочных сталей / А.Г. Глебов, А.Б. Арабей, А.Н. Луценко и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2010. – № 5. – С. 18–23.
9. Глебов А.Г. Образование кристаллизационных нитридов к конструкционной стали / А.Г. Глебов, В.Э. Киндоп, А.Г. Свяжин и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2011. – № 11. – С. 30–35.
10. Глебов А.Г. Нитриды титана в трубной стали / А.Г. Глебов, А.Г. Свяжин, А.Б. Арабей и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2012. – № 7. – С. 3–11.
11. Арабей А.Б. Микроструктура и дисперсные фазы трубных сталей класса прочности X80 для магистральных газопроводов / А.Б. Арабей, В.М. Фарбер, И.Ю. Пышминцев и др. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2012. – № 1. – С. 30–37.

Commercial production of the large-diameter K80 (X100) grade pipes in Russia

M.Yu. Nedzvetskiy^{1,2}, A.B. Arabey^{2*}, K.Yu. Mentyukov², M.S. Sakharov³, A.I. Smelov⁴, P.P. Stepanov⁵, D.A. Ringinen⁵, A.B. Gizatullin⁶, S.V. Shander⁶

¹ Gazprom PJSC, BOX 1255, St. Petersburg, 190900, Russian Federation

² Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

³ Severstal PJSC, Bld. 2, Clara Zetkin street, Moscow, 127299, Russian Federation

⁴ Izhora Pipe Mill JSC, Premise 1-N, Bld. 90, L-D, Izhora Plants industrial zone, Kolpino, Saint-Petersburg, 196655, Russian Federation

⁵ Vyksa Steel Works, Bld. 45, Bratyev Batashevyykh street, Vyksa, Nizhniy Novgorod region, 607060, Russian Federation

⁶ Chelyabinsk Pile Rolling Plant PJSC, Bld. 21, Mashinostroiteley street, Chelyabinsk, Chelyabinsk Region, 454129, Russian Federation

* E-mail: a.b.arabey@gmail.com

Abstract. Gazprom PJSC, Gazprom VNIIGAZ LLC together with three leading Russian metallurgical enterprises have fulfilled the first stage of the works on assessment of a technical possibility to manufacture the K80 (X100) strength grade pipes. This article presents the results of the pilot pipe tests, and shows feasibility of many requirements which have been enforced in respect to the large-diameter pipes belonging the K80 class of strength.

Keywords: large-diameter tubes, X100 grade of strength, K80 class of strength, mechanical properties.

References

1. MILLWOOD, N., N. SANDERSON, J. HAMMOND. Design and construction of pipelines in ultra-high-strength linepipe. *Pipe & Pipelines International*, 2001, March-April, pp. 17–23. ISSN 0032-020X.
2. ZHOU, J., B. ROTHWELL, W. ZHOU, et al. Application of high-grade steels to onshore natural gas pipelines using reliability-based design method. In: 2006 International Pipeline Conference, September 25–29, 2006, Calgary, Alberta, Canada, pp. 101–110.
3. STEPANOV, P.P., S.A. GRISHIN, A.A. KUZMIN, et al. Working out and commissioning of the X80 grade pipes manufactured at the Vysokovskiy Mechanical Plant JSC aimed at building the Bovanenkovo-Ukhta trunk gas pipeline, and prospects for designing extra strong pipes for the Gazprom OJSC facilities [Razrabotka i vnedreniye v proizvodstvo trub kategorii prpochnosti X80, izgotovlennykh v usloviyakh OAO “VMZ”, dlya sooryzheniya magistralnogo gazoprovoda “Bovanenkovo – Ukhta” i perspektivy razrabotki vysokoprochnykh trub dlya obyektov OAO “Uazprom”]. *Nauka i Tekhnika v Gazovoy Promyshlennosti*, 2011, no. 4 (48), pp. 12–16. ISSN 2070-6820. (Russ.).

4. ASAHИ, H., T. HARA, E. TSURU, et al. Development and commercialization of high-strength linepipe. *The Journal of Pipeline Engineering*, 2010, 1st quarter, pp. 5–18. ISSN 1753-2116.
5. HAMMOND, J. Development of standards and specifications for high strength line pipe. In: *International Symposium on Microalloyed Steels for the Oil and Gas Industry*, Araxa, MG, Brazil: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2007, pp. 43–63.
6. MOROZOV, Yu.D., A.M. KORCHAGIN, V.V. ORLOV, et al. Structure and property of strips for large-diameter pipes made of the X80–X100 grades steel [Struktura i svoystva shtripsa dlya trub bolshogo diametra iz stali kategorii prochnosti X80 – X100]. *Metallurg*. 2009, no. 3, pp. 43–49. ISSN 0026-0827. (Russ.).
7. RINGINEN, D.A., A.V. CHASTUKHIN, G.Ye. KHADEYEV, et al. Studying welding properties of the X100 grade steel [Izucheniye svarivayemosti stali klassa prochnosti X100]. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 68–74. ISSN 0026-0827. (Russ.).
8. GLEBOV, A.G., A.B. ARABEY, A.N. LUTSENK, et al. Role of silicon in forming macro- and microstructure of high-hardness steels [Rol kremniya v formirovanii makro- i mikrostruktury vysokoprochnykh staley]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2010, no. 5, pp. 18–23. ISSN 0368-0797. (Russ.).
9. GLEBOV, A.G., V.E. KINDOP, A.G. SVYAZHIN, et al. Generation of crystal nitrides for structural-grade steel [Obrazovaniye kristallizatsionnykh nitridov k konstruktsionnoy stali]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2011, no. 11, pp. 30–35. ISSN 0368-0797. (Russ.).
10. GLEBOV, A.G., A.G. SVYAZHIN, A.B. ARABEY и др. Titanium nitrides in pipe steel [Nitridy titana v trubnoy stali]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2012, no. 7, pp. 3–11. ISSN 0368-0797. (Russ.).
11. ARABEY, A.B., V.M. FARBER, I.Yu. PYSHMINTSEV, et al. Microstructure and disperse phases of the X80-grade pipe steels for trunk gas pipelines [Mikrostruktura i dispersnyye fazy trubnykh staley klassa prochnosti X80 dlya magistralnykh gazoprovodov]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2012, no. 1, pp. 30–37. ISSN 0368-0797. (Russ.).