УДК 621.774

СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СТАЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Ю. Д. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, главный научный сотрудник;
М. Ю. МАТРОСОВ, канд. техн. наук, директор Центра сталей для труб и сварных конструкций;
Б. Ф. ЗИНЬКО, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
(ГНЦ ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”, Россия, г. Москва)

Аннотация. Одним из важнейших звеньев топливно-энергетического комплекса России являются магистральные газопроводы, около 75 % которых составляют газопроводы большого диаметра (1020–1420 мм) на рабочее давление до 7,5 МПа. Большой вклад в создание трубных сталей и освоение технологии их производства на металлургических предприятиях отрасли внес ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. Институтом совместно с ведущими металлургическими комбинатами разработан ряд трубных сталей, которые успешно используются при строительстве современных газовых и нефтяных магистралей. Рассмотрены тенденции повышения требований к характеристикам сталей для труб большого диаметра газо- и нефтяных магистральных трубопроводов, проанализированы этапы создания марочного состава сталей и технологии производства проката. Определены основные технологические требования для достижения высокого уровня механических свойств. Показано, что стали классов прочности К60–К65 удовлетворяют требованиям северных магистралей на давление до 11,8 МПа, толстостенных подводных трубопроводов на давление до 25 МПа, и труб для сейсмоопасных районов. Металлургические и трубные заводы России обеспечивают производство одношовных труб толщиной до 40–60 мм с антикоррозионным внешним и гладкостенным внутренним покрытием.

Ключевые слова: магистральные газопроводы, трубы большого диаметра, требования к трубным сталям, механические свойства труб, марочный состав сталей, свойства проката для изготовления труб.

Ссылка для цитирования. Морозов Ю.Д., Матросов М.Ю., Зинько Б.Ф. Создание современных сталей и технологии производства трубы большого диаметра для нефтегазовых магистралей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 497–506.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-497-506

CREATION OF STATE-OF-THE-ART STEELS AND TECHNOLOGY OF LARGE DIAMETER PIPES PRODUCTION FOR OIL AND GAS PIPELINES

YU. D. MOROZOV, PhD (Tech), Chief Res. Ass.;
M. YU. MATROSOV, PhD (Tech), Director, Center of steels for pipes
and welded structures; B. F. ZIN'KO, PhD (Tech), Leading Res. Ass.
(GNZ FGUP “CNIIchermet after I.P. Bardin”, Russia, Moscow)

Abstract. The pipelines are one of most important section of the fuel and energy complex of Russia. About 75% of them are presented by gas pipelines of large diameter (1020–1420 mm) for the operating pressure up to 7.4 MPa. CNIIchermet after I.P. Bardin put a big contribution into creation of pipe steels and mastering of technologies for their production at steel-works of Russia. The Institute in cooperation with leading steels-works developed an array of pipe steel, which are successfully used at construction of modern gas and oil pipelines. Tendencies of requirements increasing to characteristics of steels for large diameter pipes for pipelines considered, creation stages of grade range of steels and technology of rolled products production analyzed. Main technological requirements for achieving mechanical properties high level determined. It was shown, that K60–K65 strength class steels meet requirements to northern pipelines for a pressure up to 11.8 MPa, to thick walled underwater pipelines for a pressure of 25.0 MPa and to pipes for seismic arears. Steel-works and pipe-manufacturing plant of Russia provide the production of longitudinal-welded pipes with wall thickness up to 40–60 mm with anticorrosion external coating and smooth internal coating.

Key words: gas pipelines, large diameter pipes, requirements to pipe steels, mechanical properties of pipes, grade range of steels, rolled product properties for pipes manufacturing.

For citation. Morozov Yu.D., Matrosov M.Yu., Zin'ko B.F. Creation of start-of-the-art steels and technology of large diameter pipes production for oil and gas pipelines. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 497–506. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-497-506

На современном этапе развития топливно-энергетического комплекса России одним из важнейших его звеньев являются магистральные газопроводы, протяженность которых превышает 190 тыс. км. При этом около 75 % составляют газопроводы большого диаметра (1020–1420 мм) на рабочее давление до 7,5 МПа. Такие транспортные системы позволяют обеспечить высокую производительность подачи газа на большие расстояния (>3000 км) из Западной Сибири в европейские регионы, являющиеся пока основными потребителями газа.

На протяжении десятилетий ЦНИИчермет им. И.П. Бардина в СССР, а затем и в России являлся головной организацией создания трубных сталей и освоения технологии их производства на металлургических предприятиях отрасли [1]. Первые электросварные трубы для магистральных газопроводов диам. 530 мм начали изготавливаться в 1948 г. Для изготовления экспандированных труб диам. 1020 мм была использована сталь 19Г, а для неэкспандированных, горячеправленных в условиях 1-го цеха Харцызского трубного завода (ХТЗ) — сталь 14ХГС. Но уже в середине 60-х годов прошлого века ЦНИИчермет им. И.П. Бардина совместно с Череповецким металлургическим заводом для экспандированных труб диам. 1200–1220 мм разработал сталь 17Г1С с прочностью 510 Н/мм² и гарантируемым значением ударной вязкости KCU = 40 Дж/см² (при –40 °С). Использование нормализации при изготовлении проката позволило увеличить сопротивление стали хрупкому разрушению и за счет измельчения зерна повысить предел текучести. В дальнейшем, с 1978 г., эта сталь с пониженным содержанием серы (не более 0,02 %) и фосфора (не более 0,025 %) стала выпускаться под маркой 17Г1С-У. В зарубежных стандартах ей соответствует сталь класса прочности X52.

Дальнейший период характеризуется применением для микролегирования трубных сталей ванадия. В 1970–1978 гг. на ряде металлургических заводов СССР (“Азовсталь”, ОХМК, Череповецкий металлургический завод, КомМЗ) ЦНИИчермет им. И.П. Бардина выполнил широкий комплекс работ по отработке состава и технологии производства сталей с карбонитридным упрочнением марок 14Г2САФ, 16Г2САФ, 17Г2САФ с прочностью 550–590 Н/мм² на рабочее давление до 7,5 МПа для труб диам. 1020–1400 мм. Трубы в двухшовном исполнении изготавливались в новом цехе ХТЗ (диам. 1420 мм) и на ЧТПЗ (диам. 1020–1220 мм). Прокат из этих сталей предназначался для изготовления труб магистральных трубопроводов, работающих в районах Севера и Сибири. Ударная вязкость составляла KCU = 50 Дж/см² при –60 °С (для труб

ЧТПЗ) и KCV = 90 Дж/см² при –15 °С (для труб ХТЗ).

Стремление к дальнейшему улучшению свариваемости, пластичности и вязких свойств сталей повышенной прочности, а также необходимость удовлетворения растущих требований газовой промышленности в отношении качества металла труб для эксплуатации в условиях Крайнего Севера привело к созданию нового поколения трубных сталей, так называемых малоперлитных, содержание углерода в которых было понижено до 0,08–0,12 %. В состоянии после контролируемой прокатки они обеспечивали $\sigma_T = 410\text{--}450$ Н/мм² в зависимости от содержания легирующих элементов и режима прокатки. Производство малоперлитных сталей было создано ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина” в кооперации с НЛМЗ (выплавка, рафинирование в ковше, разливка на МНЛЗ в слябы) и комбинатом “Азовсталь” (контролируемая прокатка на стане 3600). Производство малоперлитных сталей 07Г2ФБ, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ, безниобиевой 10Г2Ф, безванадиевых 09Г2БТ, 10Г2БТ, 10Г2Т, 13Г1С-У освоено на основных металлургических заводах, изготавливающих толстолистовой прокат для газопроводных труб большого диаметра.

К сталям для труб большого диаметра предъявляются высокие требования одновременно по прочности, пластичности, низкотемпературной вязкости, хладостойкости и свариваемости. Большое достижение металлургов — освоение производства штрипсового проката класса прочности K60 в толщинах от 15,7 до 18,7 мм со следующими характеристиками [2]:

- временное сопротивление $\sigma_B \geq 590$ Н/мм²;
- предел текучести $\sigma_T \geq 490$ Н/мм²;
- относительное удлинение $\delta_5 \geq 22$ %;
- ударная вязкость $KCV^{-20} \geq 90$ Дж/см² с долей вязкой составляющей в изломе образцов ИПГ (В) не менее 85 %
- углеродный эквивалент $C_s \leq 0,43$.

В связи с усложнением условий эксплуатации и строительством новых трубопроводов в северных районах Сибири, сейсмически активных горных районах Забайкалья и Приамурья, а также в морских условиях (подводных) требования к штрипсовому прокату ужесточаются. Поэтому сегодня стоит вопрос о производстве сталей классов прочности K65–K70 (X80–X90) со следующими характеристиками: $\sigma_B = 640\text{--}690$ Н/мм², $\sigma_T = 540\text{--}630$ Н/мм², $KCV^{-20} \geq 170\text{--}250$ Дж/см², B^{-20} (при –20 °С) до 100 %. Отдельные потребители предусматривают испытания на ударную вязкость (KCV) при –40 °С, $C_s = 0,38$ и параметр стойкости против растрескивания при сварке $P_{cm} \leq 0,20$.

Тенденция роста требований к характеристикам сталей для магистральных газонефтепроводов в 1995–2010 гг. показана в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ СТАЛЕЙ
ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ В 1995–2010 гг.

TABLE 1. REQUIREMENTS TO CHARACTERISTICS OF STEEL OIL PIPE LINES IN 1995–2010

Показатель	1995 г.	2005 г.	2010 г.
Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	590 (K60)	640 (K65)	690 (K70)
Предел текучести σ_t , Н/мм ²	510	560	610
Ударная вязкость KCV ⁻²⁰ , Дж/см ²	90	170	250 (–40 °C)
Доля вязкой составляющей В ⁻²⁰ (ИПГ), %	85	95	100
Углеродный эквивалент C _э	0,43	0,38 (ВСТО)*	0,38 (ВСТО)
Коэффициент трещиностойкости R _{см}	0,24	0,22 (ВСТО)	0,22 (ВСТО)
Рабочее давление, МПа	7,5–8,5	10,0–12,0	20,0–25,0

* Проект «Восточная Сибирь – Тихий океан».

Необходимость производства сталей с таким высоким комплексом свойств ставит перед металлургами задачи освоения выпуска проката и труб более сложного сортамента, к числу которых в первую очередь относятся:

- прокат и трубы диам. 1420 мм на рабочее давление до 12 МПа;
- прокат и трубы классов прочности K65–K70;
- прокат толщиной 40 мм для толстостенных труб диам. 1020–1220 мм для подводных трубопроводов на рабочее давление до 25 МПа;
- трубы, стойкие к сероводородному растрескиванию, в том числе для подводных трубопроводов;

– трубы повышенной стойкости для участков, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением.

Такие требования по качеству сталей и труб вызывают необходимость создания новых композиций химического состава сталей и технологических схем производства проката.

Анализ показывает, что тенденцией развития производства трубных сталей становится измельчение действительного зерна с 8 мкм в 1970 г. для стали класса прочности K56 до 1–2 мкм для стали класса прочности K70 (см. рисунок) [2]. Измельчение зерна является единственным механизмом, повышающим одновременно прочность и хладостойкость металла.

Тенденции развития сталей для хладостойких труб большого диаметра

Development tendencies of steels for cold resistant large diameter pipes

Таким образом, основные направления развития технологии производства трубных сталей можно сформулировать следующим образом:

- измельчение зерна;
- снижение содержания углерода, что улучшает вязкость, свариваемость и сегрегационную однородность металла;
- повышение степени чистоты по вредным примесям и газам;
- микролегирование;
- переход от традиционной ферритно-перлитной к ферритно-бейнитной и бейнитной структурам в зависимости от требуемого уровня прочности стали.

Эффективным способом упрочнения является использование структурной составляющей МА (мартенсит, аустенит).

Основными направлениями совершенствования технологии прокатки являются применение термомеханической прокатки с ускоренным охлаждением (УО) для максимального измельчения зерна. Традиционная низкотемпературная контролируемая прокатка (КП) позволяет получать мелкозернистую структуру (размер зерна феррита до 4–5 мкм у стали 10Г2ФБ). Переход от низкотемпературной контролируемой прокатки с охлаждением металла на воздухе к термомеханическому контролируемому процессу с регламентированным ускоренным охлаждением обеспечивает получение мелкодисперсной равномерной структуры (без разнотекстурности и полосчатости) с пониженным уровнем напряжений. С этой целью необходимо оснащение прокатных станов соответствующим оборудованием с автоматизацией процесса прокатки и охлаждения.

Самым важным показателем качества сталей для газопроводных труб, для обеспечения которого используется контролируемая прокатка, является тест ИПГ (DWTT), требующий наличия исключительно мелкозернистой структуры. Использование с этой целью термической обра-

ботки — закалка с последующим отпуском — неэкономично и не всегда обеспечивает выполнение теста ИПГ. Для эффективного использования технологии термомеханической прокатки с последующим ускоренным охлаждением необходимо соответствующее изменение химического состава сталей. Ниобий, как микролегирующий элемент, позволяет при контролируемой прокатке управлять процессами структурообразования и измельчения зерна. Он остается необходимым элементом и при использовании контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением. В этом случае ниобий вводится в больших количествах, чем в сталь для низкотемпературной прокатки. После окончания деформации он остается в твердом растворе (0,02–0,03 %), снижает температуру начала превращения и тем самым способствует образованию бейнита, а после превращения выделяется в виде мелких карбидов, которые упрочняют металл.

В настоящее время российская металлургия идет по пути обеспечения строительства новых газонефтепроводов высококачественными трубами из листового проката отечественного производства. Повышенное рабочее давление $P_{\text{раб}} = 11,8$ МПа (120 атм) используется для эффективной транспортировки углеводородов на значительные расстояния. Критериями пригодности труб класса прочности K65 для использования при $P_{\text{раб}} = 11,8$ МПа являются (помимо традиционного комплекса механических свойств) повышенный уровень ударной вязкости основного металла $KCV^{40} \geq 250$ Дж/см², а также успешное прохождение натурных пневматических испытаний плетей на полигоне ОАО «Газпром» (г. Копейск).

В табл. 2 представлены современные требования к уровню механических свойств толстолистового проката в зависимости от рабочего давления газопроводов.

ТАБЛИЦА 2. ТРЕБОВАНИЯ ПО СВОЙСТВАМ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ (ПОПЕРЕЧНЫЕ ОБРАЗЦЫ)

TABLE 2. REQUIREMENTS TO SHEET STEEL PROPERTIES FOR PIPE LINES (CROSS SAMPLES)

Класс прочности	Рабочее давление, МПа	σ_n , Н/мм ² , не менее	σ_t , Н/мм ² , не менее	σ_t/σ_n , не более	KCV, Дж/см ² , не менее	B (ИПГ ⁻²⁰), %, не менее	C ₂ , не более	P _{см} , не более
K60	7,4	590	500	0,90	98 (–20 °C)	80	0,43	0,23
K60	8,2	590	500	0,90	108 (–20 °C)	80	0,43	0,23
K60	11,8	590	500	0,90	154 (–20 °C)	90	0,43	0,23
K65	11,8	640	570	0,92	260 (–40 °C)	90	0,45	0,23
DNV 485 FD	≤24,6	570–740*	500–605	0,91	134 (–10 °C)	90	—	0,22

* Испытания на растяжение образцов проката категории DNV 485 FD в продольном и поперечном направлениях.

ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» совместно с ведущими металлургическими комбинатами разработал ряд новых марок трубных сталей, которые успешно используются при строительстве современных газовых и нефтяных магистралей (табл. 3). Поэтому отличительной чер-

той магистрального газопровода «Бованенково – Ухта» является использование наряду с трубами из традиционной стали класса прочности K60 ($\sigma_B > 590 \text{ Н/мм}^2$) труб класса прочности K65 ($\sigma_B > 640 \text{ Н/мм}^2$) размерами 1420×23,0 и 1420×27,7 мм [1].

ТАБЛИЦА 3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТАЛИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПАРТИЙ
(МАССОВАЯ ДОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ, %)

TABLE 3. CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL OF INDUSTRIAL BATCH (MASS SHARE OF ELEMENTS, %)

Класс прочности	Толщина, мм	C	Si	Mn	S	P	Другие элементы	C _{мис}
K60	12–22	0,07–0,10	0,20–0,30	1,4–1,7	≤0,003	≤0,012	Nb, Ti, V	≤0,40
K60	Свыше 22	0,07–0,10	0,20–0,30	1,5–1,7	≤0,003	≤0,012	Ni, (Cu), Nb, Ti, V	≤0,40
DNV 485 FD	23–30	0,07–0,09	0,20–0,30	1,6–1,75	≤0,003	≤0,012	Ni, (Cu), Nb, Ti, V	≤0,41
K65-ЧМ	23–28	0,05–0,07	0,20–0,30	1,6–1,8	0,003	≤0,01	Ni, Cu, Mo, Ti	≤0,45

Результаты исследования микроструктуры стали и испытаний труб показывают, что применение различных составов стали и режимов термомеханической обработки закономерно приводит к формированию микроструктуры стали с различными сочетаниями структурных составляющих. При этом важнейшими факторами структурообразования являются морфологические особенности продуктов бейнитного превращения в матрице стали и характер распределения углерода между структурными составляющими. Наиболее благоприятным типом микроструктуры стали класса прочности K65 в рассмотренных условиях являлась сталь, имеющая матрицу из смеси игольчатого и квазипolygonального феррита и малой доли polygonального феррита, минимальное количество прослоек цементита на границах зерен и блоков феррита, при этом углерод содержался преимущественно в высокоуглеродистых структурных составляющих (дисперсные «островки» МА-составляющей, верхнего бейнита и вырожденного перлита).

Для получения толстолистового проката (до 40 мм) для подводной части Северо-Европейского газопровода ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» и Череповецким металлургическим комбинатом (ЧерМК) разработана сталь категории прочности X70 в соответствии с требованиями DNV 485 IFD, микролегированная добавками ниобия и ванадия и дополнительно содержащая добавки никеля и молибдена. Прокат имеет дисперсную феррито-бейнитную микроструктуру, что обеспе-

чивает (для толщины проката 34,6 мм) сочетание высоких значений прочностных свойств ($\sigma_B = 520\text{--}570 \text{ Н/мм}^2$) и низкотемпературной вязкости (характерным является уровень $KCV^{-10} = 380\text{--}400 \text{ Дж/см}^2$).

С использованием ускоренного охлаждения изготовлены промышленные партии проката на «Уральской стали» и ЧерМК из разработанной ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» сероводородостойкой стали (07–08)ГБУ-У. Трубы diam. 720 мм производства Выксунского металлургического завода (ВМЗ), изготовленные из этой стали, прошли аттестационные испытания на Оренбургском месторождении природного газа, содержащем сероводород (до 5 %), и получили положительную оценку.

Металл труб отличается высокими показателями при всех испытаниях на сероводородную стойкость (CLR и CNR равны нулю, пороговое напряжение $0,8\sigma_T$).

В настоящее время в ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» ведутся работы по разработке и опробованию сталей более высоких категорий прочности — X100 и X120. Промышленное опробование производства проката класса прочности X100 (толщиной 20 мм) из стали без добавок бора было произведено на ЧерМК совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» в 2008–2010 гг. В табл. 4 и 5 показаны химические составы стали лабораторной выплавки и свойства проката (опытных полос толщиной 12 мм), полученные в лабораторных условиях на стане дуо 300 [3].

ТАБЛИЦА 4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПЛАВОК СТАЛЕЙ X100 И X120

TABLE 4. CHEMICAL COMPOSITION OF EXPERIMENTAL HEATS OF X100 AND X120 STEELS

Плав- ка	Содержание элементов, % (мас.)											Р _{см} , %	С _з , %
	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Ti	Nb	B	другие, не более 0,4 %		
1	0,06	0,22	1,95	0,006	0,001	0,005	0,03	0,025	0,07	—	Ni, Mo, Cu, Cr	0,22	0,52
2	0,07	0,33	2,0	0,008	0,003	0,005	0,03	0,033	0,07	—	Ni, Mo, Cu, Cr	0,24	0,53
3	0,04	0,22	2,0	0,008	0,001	0,005	0,03	0,022	0,07	0,0020	Ni, Mo, Cu, Cr	0,23	0,60
4	0,05	0,28	2,0	0,008	0,003	0,005	0,03	0,028	0,06	0,0015	Ni, Mo	0,19	0,52

ТАБЛИЦА 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПЛАВОК СТАЛЕЙ X100 И X120

TABLE 5. MECHANICAL PROPERTIES OF EXPERIMENTAL HEATS OF X100 AND X120 STEELS

Плавка	σ_t , Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ_5 , %	σ_t/σ_b	ψ , %	KV ⁻³⁰ , Дж	Температура вязкохрупкого перехода T _{виз} , °C
1	872	948	17,4	0,92	79	267	Ниже –90
2	740	915	16,0	0,81	Нет св.	260	Нет св.
3	968	1053	13,1	0,92	72	243	Ниже –70
4	830	930	14,0	0,98	Нет св.	192	Нет св.
Требования ISO 3183: 2007 для X100 (min– max)	690–840	760–990	11,4	≤0,97	—	—	—
Требования ISO 3183: 2007 для X120 (min– max)	830–1050	915–1154	9,6	≤0,99	—	—	—

Исследование микроструктуры, проведенное с использованием сканирующей электронной микроскопии (микроскоп Tescan Vega) и просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп JEM-200CX), показало, что уровень свойств проката категории прочности X120 достигается как при использовании сталей без бора, так и с добавкой бора путем формирования микроструктуры с различным типом матрицы стали. В металле без бора структура в основном представлена игольчатым ферритом и гранулярным бейнитом. Микроструктура металла, микролегированного бором, в основном состоит из малоуглеродистого реечного мартенсита.

Химический состав стали X100 должен также подбираться с учетом возможностей ускоренного охлаждения и конфигурации оборудования в линии стана, что в целом определяет “технологические окна” процесса термомеханической обработки, необходимые для формирования целевой микроструктуры.

Одним из обязательных элементов разработки новых сталей является оценка свариваемости. Для современных низколегированных сталей актуальным вопросом свариваемости является обеспечение сопротивляемости образо-

ванию холодных трещин в околошовной зоне (ОШЗ) сварных соединений и достаточного уровня ударной вязкости металла ОШЗ в широком диапазоне режимов сварки. Исследование свариваемости производится в ФГУП “ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина” по методике имитации воздействия термического цикла сварки на микроструктуру и свойства металла ОШЗ [4].

Современные трубные стали различных категорий прочности (от X70 до X100) характеризуются широкой областью формирования низкоуглеродистого бейнита в ОШЗ, что обеспечивает в целом повышенные значения ударной вязкости ($KCV^{40} \geq 40-70$ Дж/см² для разных категорий прочности) этого участка при скоростях охлаждения от 8–10 до 100–120 °C/с. Трубные стали категорий прочности X70–X100, производимые по технологии КП + УО, имеют композиции состава с пониженным содержанием углерода и экономными добавками легирующих элементов, поэтому даже при достаточно высоких скоростях охлаждения (до 80–100 °C/с) обеспечивается сопротивляемость образованию холодных трещин по критериям критической доли мартенситной составляющей (более 15 %) и критической твер-

дости (более 350 HV 10). Поэтому стали характеризуются хорошей свариваемостью применительно как к заводским (продольные швы трубы), так и к монтажным условиям (кольцевые швы). Однако вследствие увеличения толщины металла, что требует использования при сварке повышенных тепловложений (погонной энергии), возможны затруднения с обеспечением высоких характеристик ударной вязкости из-за формирования неоптимальной микроструктуры в ОШЗ при малых скоростях охлаждения металла. Указанная проблема решается путем ограничения погонной энергии при сварке и оптимизации охлаждения соединения между накладываемыми последовательно внутренним и наружным швами трубы.

В период СССР основное производство листового проката и труб магистральных нефтегазопроводов было сосредоточено на заводах УССР. Трубы диам. 1420 мм изготавливались на ХТЗ в двухшовном варианте, а листовый прокат для их изготовления — в Мариуполе на комбинатах “Азовсталь” (стан 3600) и им. Ильича (стан 3000). Трубы диам. 1002–1220 мм производились на ЧТПЗ в двухшовном исполнении класса прочности K52–K56 из нормализованного листового проката поставки Орско-Халиловского металлургического комбината (ОХМК) и в спиральношовном исполнении в термически-упрочненном состоянии на Волжском трубном заводе (ВТЗ). На ВМЗ производили трубы диаметром до 1020 мм из листового проката комбината “Азовсталь”. На российских заводах трубы диам. 1420 мм не производились, за исключением стана 2500 ВТЗ в спиральношовном исполнении с толщиной стенки трубы до 22 мм из листового проката комбината “Азовсталь”.

В связи с отсутствием возможности производства труб диам. 1420 мм в одношовном исполнении, принятом “Газпромом” в качестве базового варианта при строительстве магистрального газопровода “Уренгой – Западная граница” для поставки газа в Европу, необходимое количество труб большого диаметра закупалось по импорту.

На момент распада СССР в России не было ни одного стана 5000, необходимого для производства листа, обеспечивающего формовку одношовной трубы диам. 1420 мм, и трубосварочного цеха, способного изготовить такую трубу, тоже не было. Важным моментом являлось отсутствие на металлургических предприятиях России освоенной технологии термомеханической обработки и оборудования для ее осуществления, без использования которого невозможно обеспечить комплекс свойств, необходимых для безаварийной работы трубопроводов.

Развитие производства сталей для труб магистральных газнефтепроводов за последние 40

лет в значительной мере определяет прогресс всей металлургической отрасли. При разработке и внедрении новых трубных сталей были освоены технологии глубокой десульфурации сталей (обработка чугуна магнием, обработка стали синтетическими шлаками, твердыми шлаковыми смесями, обработка силикокальцием для глобуляризации сульфидных включений), контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением для измельчения действительного зерна вместо более затратной термообработки, вакуумирование для снижения содержания вредных примесей, газов и неметаллических включений. Необходимость снижения содержания углерода ($\leq 0,08\%$), исключающего попадание в область перитектической реакции, уменьшение содержания фосфора и повышение требований к улучшению макроструктуры непрерывнолитого сляба привели к существенной модернизации всего оборудования металлургической отрасли.

Разработанная технология сталеплавильного передела в большегрузных конвертерах включает подготовку чугуна (десульфурация), продувку кислородом высокой чистоты, включая проведение дефосфорации, внепечную обработку, непрерывную разливку и замедленное охлаждение непрерывнолитых слябов. При этом внепечная обработка включает десульфурацию твердыми шлаковыми смесями, дегазацию расплава в вакууматорах, точечную доводку металла по химическому составу и температуре, микролегирование и модифицирование кальцием сульфидных включений. При непрерывной разливке организована защита струи металла от контакта с окружающей средой, контроль за температурой разливки, созданы условия максимального удаления неметаллических включений (перегородки и шлакообразующие смеси в проковше). Использование высокотеплоотводящих кристаллизаторов, мягкого вторичного охлаждения и мягкого контролируемого обжатия позволяет избежать подвисания слитка, трещинообразования и максимально снижает ликвацию в готовой заготовке. На ОХМК выплавка стали производится в 100-т электродуговых печах, включая использование жидкого чугуна (до 40–60 % металлозавалки). Все остальные технологические операции остались те же. Разработанная технология позволяет получать химический состав стали в узких пределах содержаний химических элементов, а содержание вредных примесей серы — до 0,001 %, фосфора — до 0,010 %, водорода — не более 2 см³/100 г, азота — до 0,006 %, неметаллических включений — не более 2 балла стандартной шкалы.

Технология современной контролируемой прокатки предполагает использование на заключительной стадии ускоренного охлаждения

листа (КП + УО) и имеет обобщающее название “термомеханическая обработка”.

Нагрев под прокатку на всех новых станах 5000 осуществляется в нагревательных печах с шагающими балками. Температура нагрева должна обеспечивать максимальный перевод в твердый раствор микролегирующих элементов, но при этом не позволять значительно расти зернам аустенита. Для стали 10Г2ФБ эта температура составляет порядка 1150 °С, а для стали 10Г2БТ — около 1250 °С. Первая стадия прокатки предусматривает измельчение зерна аустенита за счет проведения рекристаллизации аустенита. Управляющими параметрами являются температура и степень деформации, которая увеличивается со снижением температуры металла. Вторая стадия прокатки осуществляется в области, когда рекристаллизация аустенита практически не происходит и режим деформации должен обеспечить максимальное увеличение площади границ зерен аустенита. Температура окончания деформации, как правило, находится немного выше точки начала γ - α -превращения аустенита. После окончания деформации металл доставляется на установку ускоренного охлаждения, где он охлаждается со скоростью 10–25 °С/с. Температура конца охлаждения составляет 450–600 °С и зависит от ряда требований к прокату, возможностей установок ускоренного охлаждения и химического состава стали. После окончания охлаждения на установках ускоренного охлаждения листовой прокат замедленно охлаждается в стопах. В соответствии с требованиями заказчика прокат проходит УЗ-контроль по всей поверхности листа.

Технологический процесс производства труб на всех заводах примерно одинаков за исключением способа формовки и состоит из следующих операций:

- дробеметная очистка поверхности листового проката (не во всех цехах);
- обработка продольных кромок (подготовка к сварке);
- формовка листов трубной заготовки;
- догибка кромок;
- сварка технологического шва;
- сварка внутреннего шва;
- сварка наружного шва;
- контроль сварных швов УЗК и при необходимости рентгеновский контроль;
- экспандирование труб;
- снятие усиления сварного шва и нарезка фаски;
- гидравлические испытания;

– контроль концевых участков сварных швов РТК (рентген-контроль);

– контроль сплошности торцов труб магнитопорошковым методом.

Трубные и металлургические компании вложили много средств в развитие трубного производства путем строительства современных цехов и реконструкции существующих. Сегодня страна располагает мощностями по выпуску сварных труб большого диаметра в объеме 5,5 млн т (при четырехбригадной работе).

Новые станы 5000 построены на металлургических заводах ПАО ММК, ОАО ВМЗ, реконструирован цех на комбинате ОАО “Северсталь” в Колпине, на комбинате ОАО “Уральская сталь” реконструирован стан 2800 и освоена технология термомеханической обработки. Созданы современные производства по изготовлению труб большого диаметра 530–1420 мм в одношовном исполнении в ПАО “Объединенная металлургическая компания” (ВМЗ), ОАО ЧТПЗ, ПАО “Северсталь” (Ижорский трубный завод), ПАО “Трубная металлургическая компания” (ВТЗ), АО “Загорский трубный завод” и ЗАО “Лискимонстраконструкция”. На трубозвездосварочных станах ЧТПЗ, Ижорского, Выксунского и Лискинского заводов производство труб осуществляется прессшаговой формовкой, а на трубосварочных станах Волжского и Загорского заводов формовка труб осуществляется вальцами.

На ЧТПЗ и Ижорском заводе толщина стенок труб возможна до 48 мм, длина до 18,3 м, на Загорском заводе толщина стенки 8–35 мм, длина 9–12,2 м, на Волжском заводе толщина стенки трубы до 42 мм, длина до 12,5 м.

ВМЗ изготавливает трубы с толщиной стенки до 48 мм и длиной до 12 м. Лискинский завод изготавливает самые толстые трубы с толщиной стенки до 60 мм, длиной до 11,6 м с шаговой технологией формовки.

Все современные трубосварочные цеха производят трубы с наружным антикоррозионным и внутренним гладкостенным покрытием. Оборудование цехов готово производить трубы класса прочности до Х100–Х120 по API5L. На ЧТПЗ проведена реконструкция ТЭСА 1020–1220 и освоен выпуск двухшовных труб диам. 1020–1220 мм с толщиной стенки до 22 мм из штрипсового проката стана 2800 ОАО “Уральская сталь”. Кроме того, на ВТЗ действуют мощности (350 тыс. т/год труб) по выпуску спиральношовных труб диам. 530–1220 мм из рулонных штрипсов с термической обработкой в проходных печах. В табл. 6 приведена динамика производства труб большого диаметра за последние годы.

**ТАБЛИЦА 6. ПРОИЗВОДСТВО ТРУБ
БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА, тыс. т**

**TABLE 6. PRODUCTION OF LARGE DIAMETER
PIPES, thousand tons**

2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
2091	2287	3048	3526	2480	2758

Из табл. 6 видно, что производство труб большого диаметра, применяемых для строительства магистральных трубопроводов, в 2017 г. выросло к уровню 2012 г. на 31,9 %.

Крупнейшими потребителями труб большого диаметра являются ОАО “Газпром”, ОАО “АК “Транснефть” и нефтегазовые компании.

ОАО “Газпром” на ближайшую перспективу предусматривает закупать для строительства магистральных газопроводов трубы из стали классов прочности X70 (K60), X80 (K65) diam. 1420 и 1220 мм с толщиной стенки до 40 мм и длиной до 18 м на рабочее давление 9,8–11,8 МПа, с трехслойным наружным антикоррозионным полимерным и внутренним гладкостенным

покрытием. Для подводных морских участков трубопроводов, имеющих рабочее давление до 25 МПа, будут применяться трубы меньших диаметров с толщиной стенки до 48 мм с изоляционным покрытием, соответствующим специальным требованиям. Вопрос о применении труб класса прочности X100 и X120 для реализации перспективных проектов магистральных газопроводов находится в стадии изучения и проектной проработки.

ОАО “АК “Транснефть” при реализации проектов строительства нефтепроводов закладывает технические требования к качеству металла, труб и отводов на более высоком уровне, чем предусматривается известными международными стандартами. Введен контроль металла по полосчатости структуры, размеру зерна, загрязнению металла неметаллическими включениями, ударной вязкости на образцах с острым надрезом при температуре –40 °С. Выполняя требования потребителей, металлургические комбинаты и трубные компании повысили качество металла и труб.

Заключение

Разработаны стали для труб большого диаметра классов прочности K60–K65, удовлетворяющие всем требованиям основных заказчиков — ОАО “Газпром” и ОАО “Транснефть”, для трубопроводов различного назначения, включая северные газовые магистрали на давление до 11,8 МПа, толстостенные подводные на давление до 25 МПа и трубы для сейсмоопасных районов.

На металлургических и трубных заводах России построены современные прокатные станы 5000 и трубоэлектросварочные станы, обеспечивающие формовку одношовных труб большого диаметра толщиной до 40–60 мм с антикоррозионным внешним и гладкостенным внутренним покрытием с годовым объемом 5,5 млн т, превосходящим потребности всех газовых и нефтяных компаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов Ю.Д., Зикеев В.Н., Матросов Ю.И. и др. История разработки контролируемой прокатки и создание современных конструкционных сталей для газонефтепроводных труб и ответственных металлоконструкций // Сб. “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина — 60 лет научных достижений (1944–2004)”. С. 259–269.
2. Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. Стали для труб магистральных трубопроводов: состояние и тенденции развития // Металлург. 2006. № 5. С. 53–57.
3. Мартынов П.Г., Симбухов И.А., Морозов Ю.Д. Исследование трубных сталей категории прочности X100–X120 для магистральных газопроводов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. № 3. С. 66–70.
4. Арабей А.Б., Франтов И.И., Столяров В.И., Пермяков Л.П. Свариваемость и обеспечение качества сварных соединений при изготовлении высокопрочных газопроводов // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. № 4. С. 4–19.
5. Ушаков А.С., Кондратов Л.А. О производстве стальных труб // Сталь. 2018. № 7. С. 33–39.

Поступила 26 февраля 2019 г.

REFERENCES

1. Morozov Yu.D., Zikeev V.N., Matrosov Yu.I. etc. *Istoriya razrabotki kontroliruemoi prokatki i sozdanie sovremennykh konstruktsionnykh stalei dlya gazonefteprovodnykh trub i otvetstvennykh metallokonstruktsii* [The history of controlled rolling development and creation of modern structural steels for gas and oil line pipes and critical metal structures]. *Sb. TsNIIchermet im. I.P. Bardina — 60 let nauchnykh dostizhenii (1944–2004)* [Sat TsNIIchermet them. I.P. Bardin – 60 years of scientific achievements (1944–2004)]. Moscow, 2004, pp 259–269. (In Russ.).
2. Morozov Yu.D., Efron L.I. Steels for pipeline pipes: status and development tendencies. *Metallurg*, 2006, no. 5, pp. 53–57. (In Russ.).
3. Martynov P.G., Simbukhov I.A., Morozov Yu.D. Study of pipe steels of X100–X120 strength category for pipe lines. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*, 2012, no. 3, pp. 66–70. (In Russ.).
4. Arabei A.B., Frantov I.I., Stolyarov V.I., Permyakov L.P. Weldability of quality provision of welded joints at high-strength pipe line construction. *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti*, 2009, no. 4, pp. 4–19. (In Russ.).
5. Ushakov A.S., Kondratov L.A. About production of steel pipes. *Stal'*, 2018, no. 7, pp. 33–39. (In Russ.).

Received 26 February 2019