

ТРУБЫ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ИЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ – КЛЮЧЕВОЕ ЗВЕНО В СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДОВ

А. Я. Бабанин^а, д.т.н., доцент; В. В. Белоусов^б, д.т.н.; А. В. Чухаркин^а, ст. преп.

^{а)} ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

^{б)} ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

Аннотация. В результате проведенных исследований разработана комплексная технология внепечной обработки конструкционной трубной стали на агрегате ковш-печь. При выплавке конструкционной трубной стали категории прочности Х70 в условиях конвертерного производства ПАО «МК «Азовсталь» получено значительное повышение механических и служебных свойств металла. Предел текучести и предел прочности соответствуют значениям стали категории прочности Х80 производства России и требованиям стандарта API 5L. Металл опытных плавок имеет более низкую скорость коррозии по сравнению со сравнительным.

Ключевые слова: магистральные газо- и нефтепроводы, конструкционные трубные стали, внепечная обработка, механические и служебные свойства.



Бабанин
Анатолий Яковлевич



Белоусов
Вячеслав Владимирович



Чухаркин
Анатолий Витальевич

ПРОБЛЕМА И ЕЕ СВЯЗЬ С НАУЧНЫМИ И ПРАКТИЧЕСКИМИ ЗАДАЧАМИ

Проектирование, строительство и эксплуатация магистральных газо- и нефтепроводов напрямую зависят от применяемых материалов, технологий и оборудования, а также от инженерных решений, реализуемых на практике. В Российской Федерации широко освоены технологии проектирования и строительства магистральных газо- и нефтепроводов в условиях пустыни, лесной, равнинной и горной местностей, а также в условиях тундры, лесостепи. В последние годы возникла необходимость проектирования и строительства магистральных газо- и нефтепроводов в условиях вечной мерзлоты и по морскому дну, что имеет определенные сложности.

Ранее построенные магистральные газопроводы работают при давлениях 50–55 и 70–75 МПа. Однако на сегодняшний день уже существует практика строительства магистральных трубопроводов для давлений 100 и более МПа, что дает возможность увеличить пропускную способность газотранспортной системы [1]. К примеру, трубы газопровода «Северный поток-2» имеют внутренний диаметр 1153 мм, толщину стенки 30,9 мм и рассчитаны на рабочее давление до 220 МПа.

Таким образом, постоянный рост объемов добычи, в том числе за счет освоения новых месторождений и новых регионов промышленной добычи, суровые климатические условия, снижение температуры эксплуатации до минус 40–60°C, строительство газотранспортных магистралей по дну морей, увеличение рабочего давления до 8,4–15 и более МПа, обеспечение коррозионной стойкости и их эксплуатационной надежности постоянно повышают требования к качеству металла для производства труб большого диаметра [2].

Таблица 1.

Основные служебные характеристики металла для магистральных газопроводов

Годы строительства газопроводов	Марка стали	Категория прочности стали	Диаметр труб, мм	Параметры эксплуатации		Временное сопротивление, кгс/мм ²	Технология прокатки
				Рабочее давление МПа	Температура, °С		
1960–1970	17ГС	K52	1220	До 5,4	0°	52	Обычная
1970	09Г2ФБ	K55 – K60 (X70)	1420	7,4 – 8,3	-20	56 – 60	ТМП
2010–2012	10Г2ФБ	K60 (X70)	до 1420	9,8 – 11,8	-40	65 – 75	ТМП

Таблица 2.

Механические свойства основного металла труб большого диаметра в поперечном направлении [3]

Класс прочности	Временное сопротивление, σв, МПа	Предел текучести, σТ, МПа	σв / σТ, не более	Относит. удлинение, δ5 %, не более
K54	530–630	402	0,90	20
K56	549–647	432	0,90	20
K60(X70)	588–686	481	0,90	20
K65(X80)	638–736	550	0,90	18

Тенденции улучшения основных служебных характеристик металла для магистральных газопроводов представлены в таблице 1, а тенденции повышения их механических свойств – в таблице 2.

Анализ технологий производства и качества конструкционных трубных сталей свидетельствует, что существенное влияние на формирование их механических и служебных свойств оказывает размер и количество остаточных неметаллических включений (НВ) и их структурно-химическое состояние. Базовым звеном, определяющим вышеуказанные параметры, является технологический участок: выпуск металла из конвертера – кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), включающий агрегат ковш-печь (АКП) с обработкой стали высокоактивными реагентами. За последние три десятилетия технология внепечной обработки конструкционных трубных сталей претерпела значительное усовершенствование в повышении чистоты металла по вредным примесям, газам и НВ.

Исходя из этого, развитие и усовершенствование технологии внепечной обработки конструкционных сталей, обеспечивающей более высокое качество металла, разработка алгоритма ее воспроизводства по обеспечению минимального остаточного содержания и их размера, а также заданного структурно-химического состояния НВ, является актуальной проблемой, решение которой имеет важное научно-техническое и практическое значение.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ литературных данных свидетельствует, что эффективность, качество и надежность работы нефтегазотранспортных систем определяется качеством

конструкционных трубных сталей, основным направлением повышения которого является обеспечение низкого содержания вредных примесей, газов и НВ заданного структурно-химического состояния, обработка высокоактивными элементами, комплексное микролегирование упрочняющими карбонитридообразующими элементами (Nb, Ti, Mo, Co, V, Cr и др.), термомеханическая прокатка и ускоренное охлаждение [4–6].

Из вышеизложенного следует, что основа высокого качества конструкционной трубной стали создается при ее обработке в жидком состоянии, что обуславливает необходимость создания более эффективных технологий внепечной ее обработки [7–10].

ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной научной работе на основании ранее проведенных исследований разработаны и представлены основные положения комплексной технологии внепечной обработки конструкционных трубных сталей конвертерного производства, которые включают следующие наиболее эффективные технологические приемы:

- присадка мелкокускового углеродсодержащего материала фракцией 5–10 мм на дно сталеразливочного ковша в начале выпуска плавки при сливе 15–20 тонн металла (для 350-тонного сталеразливочного ковша);
- для обеспечения образования максимального количества первичных НВ в твердом кристаллическом виде присадку ферросплавов, содержащих марганец, кремний и алюминий, в сталеразливочный ковш необходимо производить в следующей последовательности:
 - а) марганецсодержащие ферросплавы – при наполнении сталеразливочного ковша на 0,5–0,6 его высоты;

б) кремнийсодержащие, а также кремний и марганецсодержащие ферросплавы – при наполнении сталеразливочного ковша на 0,6–0,7 его высоты;

в) ванадийсодержащие ферросплавы и алюминий – при наполнении сталеразливочного ковша на 0,8–0,9 его высоты;

г) температуру стали на выпуске и содержание углерода после повалки обеспечивать, соответственно, 1630–1650 °С и 0,06–0,08% °С.

Разработка новых технологических приемов внепечной обработки стали на АКП для каждого предприятия требует проведения дополнительных научных исследований и инжиниринга. Разработанный данный вариант внепечной обработки стали производится в следующей последовательности [11]:

- определение для данного производства оптимального содержания общего алюминия в стали для обеспечения заданных механических свойств;
- определение содержания алюминия, который находится в составе НВ для данного общего содержания алюминия в стали;
- корректировка содержания алюминия в стали до заданных его значений алюминиевой катанкой;
- обработка стали кальцийсодержащим реагентом, обеспечивающей отношение в НВ $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3 = 0,55\text{--}0,80$;
- формирование ковшевого шлака следует производить при обеспечении отношения $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3 = 1,3\text{--}1,7$;
- обеспечение заданного содержания кальция по вводу осуществляется путем определения степени его усвоения от содержания алюминия в стали и достигаемом содержании кальция по вводу;
- для формирования заданного остаточного содержания кальция в стали, его содержание по вводу следует поддерживать с учетом потерь кальция на технологическом участке АКП-МНЛЗ в зависимости от содержания кальция по вводу, времени выдержки от окончания обработки на АКП до разливки на МНЛЗ и соотношении Ca/Al .

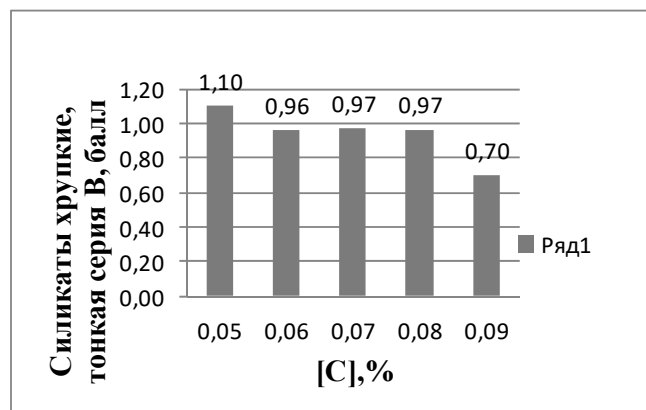
Усреднительная продувка металла аргоном производится через пористые пробки. Режим продувки осуществляется таким образом, чтобы обеспечить минимальную площадь открытой поверхности металла в закрытом крышкой сталеразливочном ковше.

Разработанный вариант технологии поточного рафинирования включает такие технологические операции:

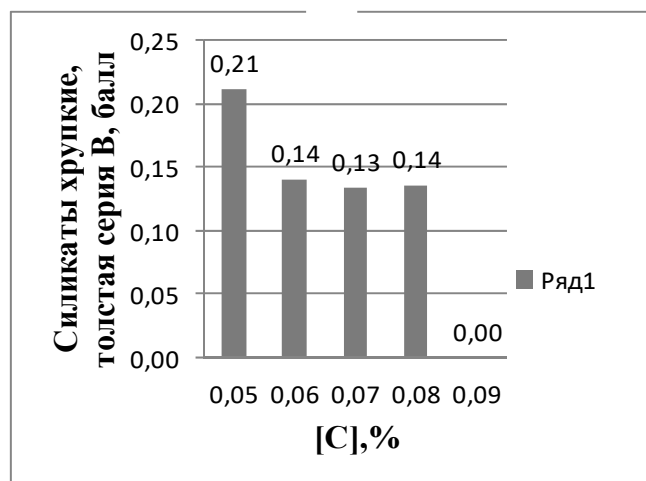
- корректировка содержания углерода в узких заданных пределах с положительным влиянием на равномерность распределения кальция и серы по поперечному сечению сляба;
- формирование оптимальной гидродинамической структуры и скорости движения циркуляционных потоков металла для создания условий максимального удаления НВ восходящими потоками в шлак;
- обеспечение минимальной глубины металла и формирование оптимальной гидродинамической структуры при перековшовке для исключения затягивания покровного шлака в кристаллизаторы.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения балла НВ в виде силикатов хрупких в зависимости от углерода в металле, соответственно: а – тонкая серия, б – толстая серия, из которой следует, что наиболее оптимальным содержанием углерода в стали является диапазон 0,06–0,08%, который обеспечивает минимальный балл силикатов хрупких, тонкой и толстой серии, равный, соответственно, 0,96–0,97 и 0,13 и 0,14 среднему баллу.

Наиболее оптимальным содержанием углерода в стали, обеспечивающим минимальный балл силикатов крупных (недеформированных) как тонкой, так и толстой серии, также является диапазон 0,06–0,08%, обеспечивающий, соответственно, 1,02–0,86 и 0,21–0,18 средний балл НВ (рис. 2).



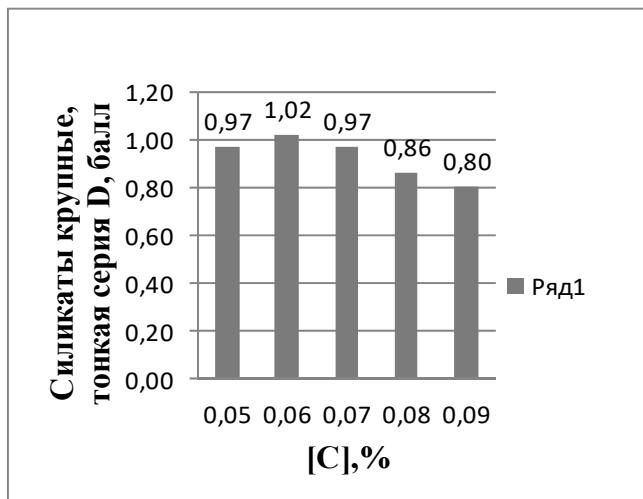
а)



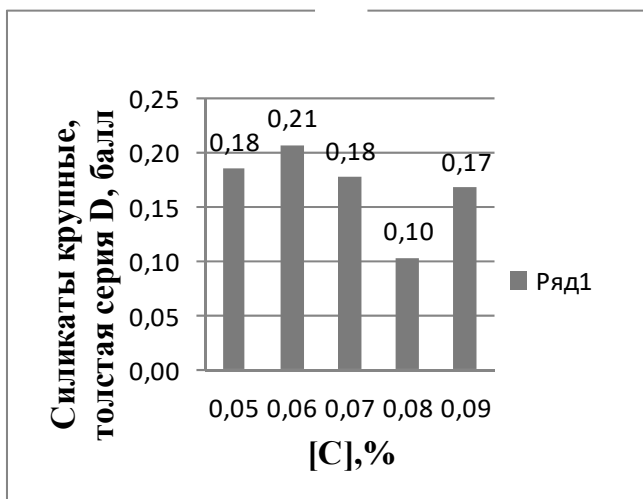
б)

Рис. 1. Зависимость балла силикатов хрупких, тонкой (а) и толстой (б) серии от содержания углерода в металле

Следует обратить внимание, что при содержании углерода в стали 0,05% содержание хрупких НВ несколько увеличивается, соответственно, тонкой и толстой серии на 0,13 и 0,07 балла, а крупных (недеформированных) НВ несколько снижается на 0,05 и 0,03 балла, соответственно, тонкой и толстой серии. Это можно объяснить тем, что при снижении содержания углерода в металле до 0,05% и его раскислении алюминием образующиеся алюминаты сложнее перевести в алюминаты кальция.



а)

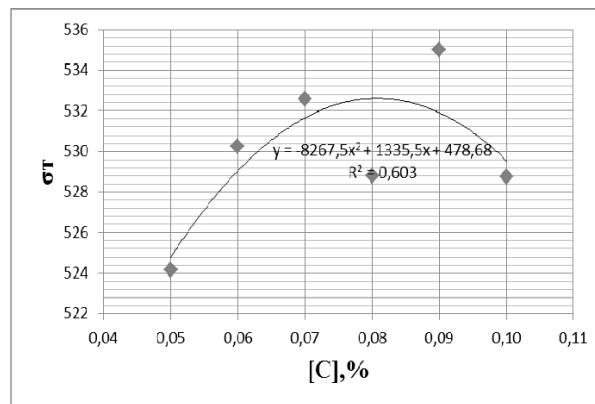


б)

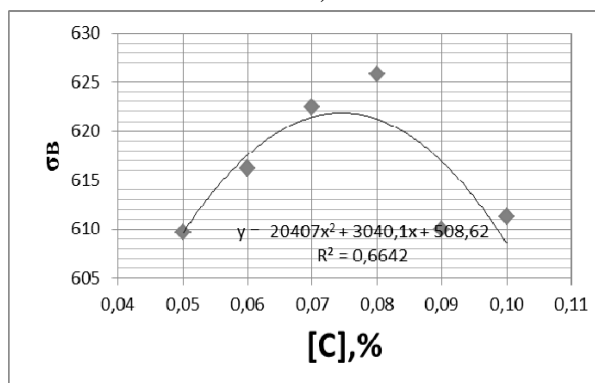
Рис. 2. Зависимость балла силикатов крупных (недеформированных) тонкой (а) и толстой (б) серии от содержания углерода в металле

На рис. 3 представлены графические зависимости влияния углерода после повалки на механические свойства толстого листа (средние значения предела текучести, предела прочности и относительное удлинение), из которых следует, что механические свойства находятся на высоком уровне, соответствующем требованиям НТД, а содержание углерода в металле после повалки существенно влияет на их величину. Для поддержания одновременно на высоком уровне предела текучести, прочности и относительного удлинения необходимо поддерживать содержание углерода в металле после повалки в диапазоне 0,06–0,08%.

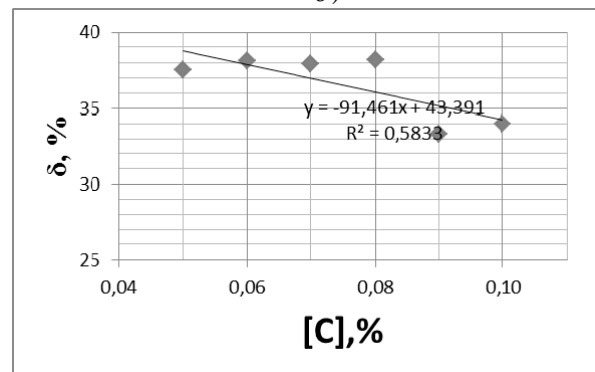
Известно, что к металлу труб большого диаметра северного исполнения предъявляются высокие требования, предусматривающие высокие значения ударной вязкости (так называемое сопротивление хрупкому разрушению). Графическая зависимость изменения средней поглощенной энергии удара по образцам Шарпи при температуре испытаний -10 °С в зависимости от содержания углерода в металле после повалки представлена на рис. 4.



а)



б)



в)

Рис. 3. Влияние углерода после повалки на механические свойства толстого листа, средние значения: а) – предел текучести, б) – предел прочности, в) – относительное удлинение

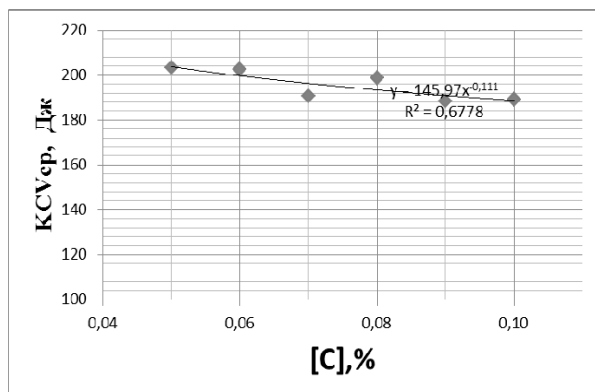


Рис. 4. Влияние углерода в металле после повалки на среднюю величину поглощенной энергии удара

Таблица 3.

Средние значения механических свойств толстолистного проката толщиной 15,9 мм из стали марки X70

Количество плавок, шт	Содержание [C]nn, %	σв, МПа	σт, МПа	δ5, н.б. %	кcu-60, Дж/см2	Скорость коррозии, мм/год	Площадь участка, пораженного коррозией, %
45	0,04–0,12	636	487	20	212	2,1	3,8
38	0,06–0,08	723	562	22	228	0,8	2,5
Разность значений / %		+87/13,6	+75/15,4	+2/10	+16/21,2	1,3/61,9	-13/34,2
X80 по API 5L		621–827	552–690				
X80 – Россия		638–736	560				

Средние значения механических свойств толстого листа, прокатанного из произведенной по разработанной технологии стали марки X70, представленные в таблице 3, свидетельствуют, что применение разработанных технологических приемов позволяет обеспечить не только высокие значения механических свойств, но и приблизить их значения к требованиям, предъявляемым к стали более высокой категории прочности X80.

Коррозионные испытания проводили химическим методом. Шлифы обрабатывали в течение 30 секунд реактивом, содержащим 0,5 % KCl (0,24 % ионов хлора) и воду, и далее в течение 10 секунд реактивом, содержащим 4 % азотной кислоты, этилового спирта и 0,1 % KCl (0,048 % ионов хлора). После испытаний шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот» при осмотре 100 полей площадью около 1 мм². Определение количественных параметров проводили методом количественной металлографии.

В результате проведенных коррозионных испытаний и пересчете установлено, что металл опытных плавок имеет более низкую скорость коррозии по сравнению со сравнительным, которая составляет, соответственно, 0,8 и 2,1 мм/год. Доля площади пораженных участков коррозии – соответственно, 2,5 и 3,8 %.

ВЫВОДЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате проведенных исследований применительно к повышению качества конструкционных трубных сталей для строительства магистральных газо- и нефтепроводов, разработана комплексная технология ее внепечной обработки стали на агрегате ковш-печь.

При выплавке конструкционной трубной стали категории прочности X70 в условиях конвертерного производства ПАО «МК «Азовсталь» с применением разработанных технологических приемов получено значительное повышение механических и служебных свойств металла. В частности, механические свойства предел текучести и предел прочности соответствуют значениям стали категории прочности X80 производства России и требованиям стандарта API 5L. Металл опытных плавок имеет более низкую скорость коррозии по сравнению со сравнительным, которая составляет, соответственно, 0,8 и 2,1 мм/в год. Доля площади пораженных участков коррозии, соответственно, 2,5 и 3,8 %.

Направление дальнейших исследований предполагает математическое описание протекающих физико-химических процессов для компьютерного управления технологией внепечной обработки стали.

Список литературы

1. Бродов А. А. О модернизации производства стальных труб / А. А. Бродов, А. Ф. Кондратов // *Сталь*. – 2010. – № 7. – С. 81-85.
2. Формирование структуры в зоне термического влияния и свойства сварных соединений трубных сталей классов прочности X80, X90, K70 / А. Ю. Иванов [и др.] // *Сталь*. – 2011. – № 7. – С. 85-90.
3. Минин А. С. Трубы прочности X80 / А. С. Минин, С. Г. Чернышов // *Нефтегазпромышленность*. – 2011. – № 6. – С. 47-50.
4. Влияние термической обработки на механические свойства и структуру высокопрочных трубных сталей / М. Ю. Матросов [и др.] // *Металлург*. – 2011. – № 7. – С. 54-58.
5. Влияние трубного передела на механические свойства листов из стали категории прочности K60 / Ю. И. Матросов [и др.] // *Сталь*. – 2012. – № 6. – С. 53-55.
6. Оценка анизотропии механических свойств и трещиностойкости листов и труб большого диаметра / В. М. Дорохин [и др.] // *Сталь*. – 2001. – № 1. – С. 65-69.
7. Исследование эксплуатационных характеристик газопроводных труб на рабочее давление до 11,8 МПа / В. И. Столяров [и др.] // *Сталь*. – 2010. – № 1. – С. 73-76.
8. Особенности и классификация структур низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных трубных сталей / М. Ю. Матросов [и др.] // *Сталь*. – 2012. – № 1. – С. 65-75.
9. Эфрон Л. И. Влияние термических режимов контролируемой прокатки на структурное состояние горячекатанного аустенита и свойства низкоуглеродистой микрелегированной стали / Л. И. Эфрон, Ю. Д. Морозов, Е. А. Голи-Оглу // *Сталь*. – 2012. – № 5. – С. 60-65.
10. Зайцев А. И. Физическая химия металлургических шлаков / А. И. Зайцев, Б. М. Могутнов, Е. Х. Шахпазов // *Интерконтакт, Наука*. – 2008. – 352 с.
11. Повышение эффективности ресурсо-экологических показателей внепечной обработки стали порошковой проволокой с кальцийсодержащими реагентами / В. В. Белоусов, А. Я. Бабанин [и др.] // *Металлург*. – 2012. – № 12. – С. 58-62.