

УДК 622.276+ [620.193.4+620.194.2]

Н.А. Девятерикова¹, e-mail: n.devaterikova@chelpipegroup.com; К.А. Лаев¹, e-mail: konstantin.laev@chelpipegroup.com;

И.В. Щербанов¹, e-mail: igor.shcherbakov@chelpipegroup.com; С.В. Александров¹, e-mail: s.aleksandrov@chelpipegroup.com

¹ АО «Первоуральский новотрубный завод» (ПНТЗ) (Первоуральск, Россия).

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ АО «ПНТЗ» В РАМКАХ СИСТЕМЫ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ОСТГ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

В статье рассмотрены основные виды и механизм развития коррозии нефтедобывающего оборудования. В качестве метода решения проблемы предлагается применение системы выбора насосно-компрессорных и обсадных труб в коррозионно-стойком исполнении производства ПНТЗ для конкретных условий эксплуатации.

Система выбора позволяет на основании физико-химического состава добываемого продукта и основных условий эксплуатации провести оценку агрессивности среды и рекомендовать оптимальные стали для конкретных условий из существующей линейки труб повышенной эксплуатационной надежности. В настоящее время широкое распространение получили несколько видов нарезных труб нефтяного сортамента из хромосодержащих марок стали, легированных ниобием, молибденом, титаном и ванадием, групп коррозионной стойкости S, C, CS и SS. В соответствии с системой выбора существующие марки стали применяются в средах с парциальным давлением CO₂ до 0,2 МПа и H₂S – до 1,01 МПа при группах прочности не выше T95 и L согласно API Spec 5CT «Casing and Tubing» и ГОСТ 633–80 «Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия».

Отмечено, что завод продолжает расширять сортамент коррозионно-стойких насосно-компрессорных труб для различных условий эксплуатации. К числу вновь разработанных марок сталей можно отнести экономнолегированную сталь повышенной эксплуатационной надежности для сред с малым содержанием углекислого газа и сероводорода, а также коррозионно-стойкие ОСТГ для сред с высоким содержанием углекислого газа и сероводорода, коррозионно-стойкие стали высоких групп прочности.

Ключевые слова: нарезная труба, нефтяной сортамент, нефтепромысловое оборудование, коррозия, лабораторное тестирование, легирование стали, коррозионная стойкость, парциальное давление, эксплуатационная надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема коррозионной стойкости нефтепромыслового оборудования является одной из важнейших с точки зрения обеспечения надежной эксплуатации скважин. Особенно актуальной она становится на завершающей стадии эксплуатации месторождения, когда коррозия усиливается в силу ряда

причин, в числе которых увеличение обводненности, применение химических методов интенсификации отдачи пласта, рост коррозионной агрессивности среды за счет образования биогенного сероводорода вследствие биопоражения добываемого продукта и т. д. В этих условиях использование стандартных марок сталей, реко-

мендованных ГОСТ 632–80 «Трубы обсадные и муфты к ним. Технические условия», ГОСТ 633–80 «Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия» и ГОСТ 31446–2017 «Трубы стальные обсадные и насосно-компрессорные для нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия», зачастую становится

экономически неэффективным из-за быстрого выхода труб и трубопроводной арматуры из строя. Для решения этой проблемы на ПНТЗ была разработана система выбора материала насосно-компрессорных труб (НКТ), включающая в себя:

- методику оценки коррозионных процессов добывающего оборудования нефтегазовых скважин;
 - систему выбора труб в зависимости от действующих коррозионных факторов;
 - несколько линеек насосно-компрессорных и обсадных труб.
- Система постоянно совершенствуется, осуществляется разработка новых материалов, обусловленная усложняющимися условиями эксплуатации.

КОРРОЗИЯ ПРИ ДОБЫЧЕ НЕФТИ И ГАЗА

В общем смысле коррозия – процесс разрушения материалов в результате взаимодействия с агрессивной средой. В случае нефтепромыслового оборудования главными особенностями коррозионного разрушения являются гетерогенность добываемого флюида («нефть – газ – вода») и разнообразие факторов коррозии, действующих на материал трубы. В зависимости от преобладания тех или иных факторов коррозии можно выделить следующие основные ее виды:

- углекислотная;
- сероводородная;
- при трении (фреттинг-коррозия);
- под напряжением;
- бактериальная.

Примеры различных видов коррозионных повреждений, обусловленных данными видами коррозии, представлены на рис. 1.

К наиболее опасным видам коррозионных разрушений нефтепромыслового оборудования относятся локальная коррозия по CO_2 -механизму, в ряде случаев осложненная наличием сероводорода, и сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением (СКРН).

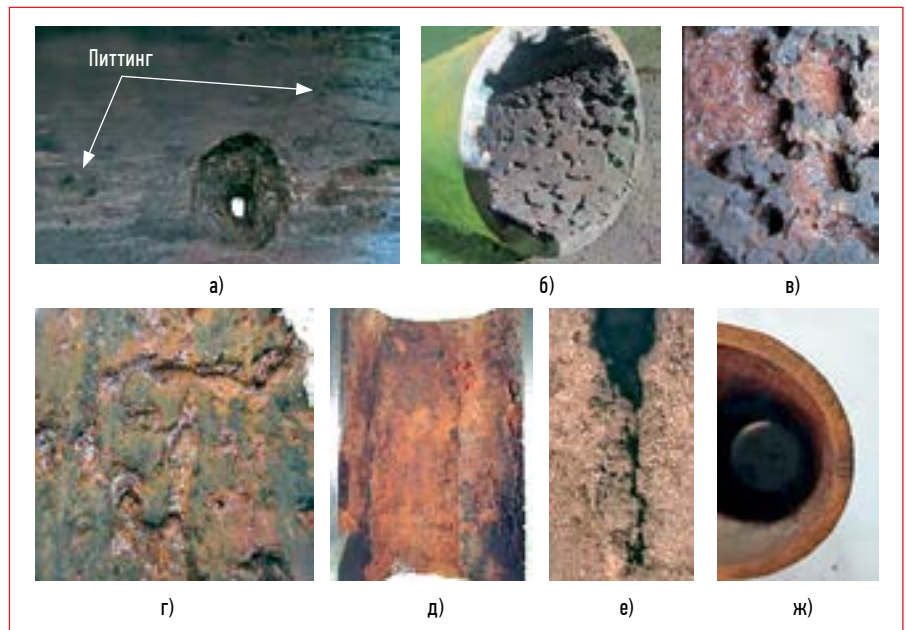


Рис. 1. Примеры коррозионных повреждений насосно-компрессорных труб:

а) питтинг и язва под действием CO_2 -коррозии и соляно-кислотных обработок; б) и в) подпленочная коррозия под действием CO_2 и высоких температур; г) мейза-коррозия; д) коррозионно-механическое изнашивание стенки трубы штангами глубинных насосов; е) сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением; ж) разрушение трубы под действием сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением

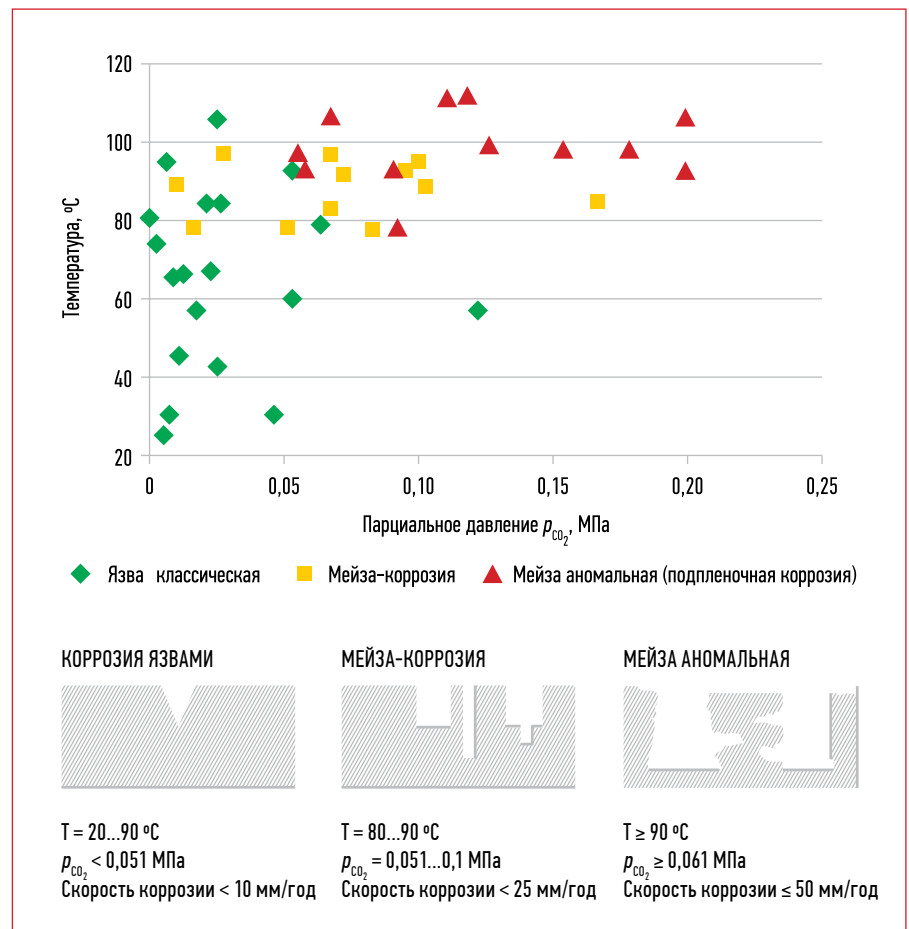


Рис. 2. Типы язвенной коррозии в зависимости от температуры и содержания CO_2

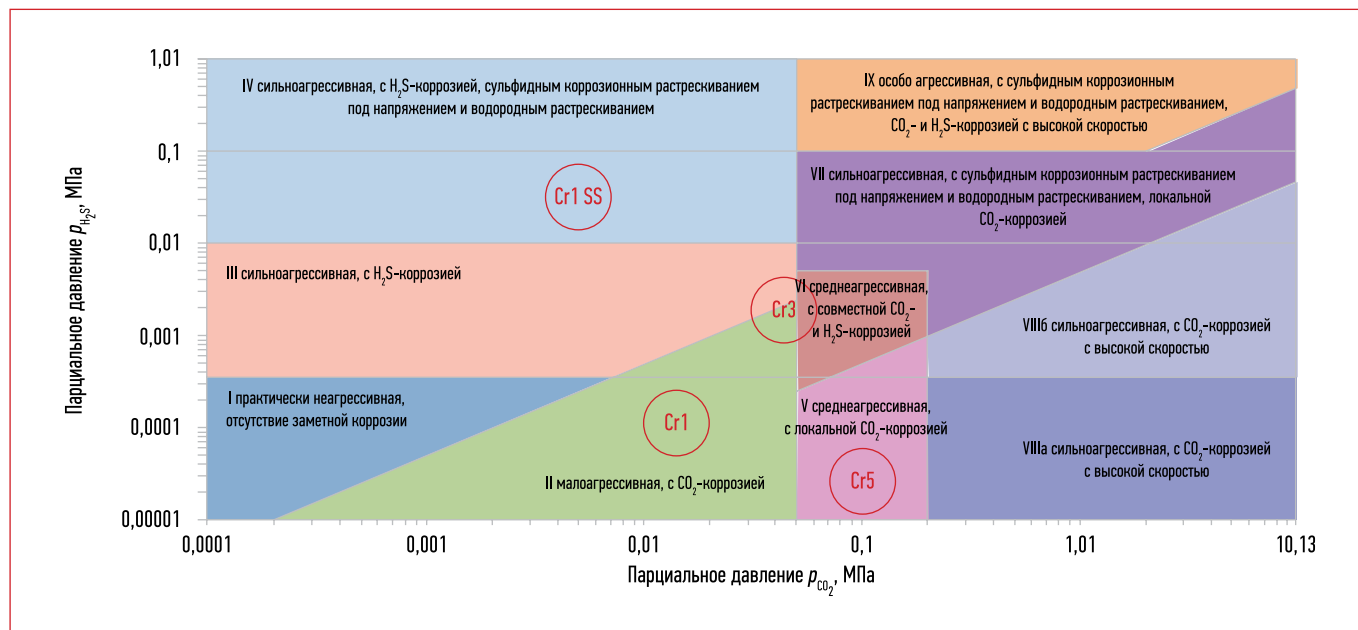


Рис. 3. Примерная схема выбора марки стали для различных условий эксплуатации АО «ПНТЗ»

Локальная коррозия может развиваться в виде как язв классической формы, так и мейза-коррозии, включая мейза-коррозию с аномально высокой скоростью, развивающейся под слоем плотно сцепленных продуктов коррозии [1]. При этом повышение температуры и содержания углекислого газа оказывает значительное влияние на характер повреждений и скорость коррозии, составляющую 0,5–50 мм/год (рис. 2).

Наиболее опасным проявлением воздействия сероводорода является образование трещин, распространяющихся по толщине стенки трубы при одновременном воздействии сероводорода (СКРН), вследствие чего может произойти внезапное полное разрушение трубы (рис. 1е, ж).

В силу существенного различия механизмов, вызывающих разрушение металла под воздействием коррозионных сред с различным содержанием агрессивных газов, меры воздействия на коррозионный процесс в целях его подавления для обеспечения требуемой коррозионной стойкости должны быть различными. Так, коррозионная стойкость стали в CO_2 -содержащих средах обеспечивается

ферритно-перлитной микроструктурой, легированием Cr в количестве до 5 % в сочетании с модифицирующими добавками Mo, V, Ti, Nb. Повышение стойкости стали к водородному растрескиванию (ВР) и СКРН в сероводородсодержащих средах и в средах с возможным наличием малых количеств углекислого газа обеспечивается за счет измельчения кристаллического зерна, увеличения доли мартенсита в структуре и содержания элементов, подавляющих коррозию, что реализуется при комплексном легировании стали Cr в количестве не более 1,5 % (масс.), Mo, V, Nb, Ti. В средах с высоким содержанием сероводорода, так и углекислого газа необходимо применение нержавеющих сталей с высоким содержанием Cr и Ni.

Однако для того, чтобы определить, какую трубу необходимо использовать в том или ином случае, надо понимать основной механизм коррозионного повреждения.

СИСТЕМА ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ОСТГ

Система выбора нарезных труб нефтяного сортамента (ОСТГ), разработанная и применяемая в ПНТЗ, позволяет на основании физико-

химического состава транспортируемого продукта и основных условий эксплуатации провести оценку агрессивности среды и рекомендовать оптимальные стали для данных условий из существующей линейки труб [2].

Система выбора выделяет в качестве основных факторов, определяющих механизм внутренней коррозии скважинного оборудования, содержание углекислого газа и сероводорода и их соотношение. В качестве осложняющих факторов рассматриваются минеральный состав попутно добываемых вод, термобарические условия в скважине, процессы солеобразования, наличие механических примесей и т. д. По сравнению с ближайшими аналогами (например, системой выбора Sumitomo) система ПНТЗ предполагает расширение области применения экономнелегированных марок сталей с содержанием хрома до 5 % (рис. 3).

Алгоритм предполагает выполнение следующих операций:

- получение информации об условиях эксплуатации на скважине;
- расчет парциальных давлений сероводорода, углекислого газа и их соотношения;

Таблица 1. Рекомендации по применению марок стали в коррозионных средах

Тип среды	Группа коррозионной стойкости	Граничные условия эксплуатации (парциальное давление p , МПа)*	Марки стали	Группа прочности
Среды с малым содержанием сероводорода и углекислого газа	S	$p_{CO_2} \leq 0,1; p_{H_2S} \leq 0,0035$	18ХМФБ; 18Х1МФБ; 18ХЗМФБ; 30ХГМА	К–Л; N80 тип Q; L-80 тип 1; C90 тип 1; T95 тип 1
Среды со средним содержанием углекислого газа, в т. ч. с малым содержанием сероводорода	C	$p_{CO_2} < 0,051; p_{H_2S} < 0,00035$	18ХМФБ; 18Х1МФБ; 18ХЗМФБ; 30ХГМА	К–Л; N80 тип Q; L-80 тип 1; C90 тип 1; T95 тип 1
		$0,5 \leq p_{CO_2} < 0,2; p_{H_2S} < 0,00035$	18ХЗМФБ; 15Х5МФБ	К–Е; N80 тип Q; L-80 тип 1
Среды со средним содержанием углекислого газа и сероводорода	CS	$p_{CO_2} < 0,051; p_{H_2S} \leq 0,01$	18ХМФБ; 18Х1МФБ; 18ХЗМФБ; 30ХГМА	К–Л; N80 тип Q; L-80 тип 1; C90 тип 1; T95 тип 1
		$0,5 \leq p_{CO_2} < 0,2; p_{H_2S} \leq 0,01$	18ХЗМФБ	К–Е; N80 тип Q; L-80 тип 1
Сероводородные среды с высоким содержанием сероводорода, в т. ч. с малым содержанием углекислого газа	SS	$p_{CO_2} < 0,051; p_{H_2S} \geq 0,01$	18ХМФБ; 18Х1МФБ	К–Е; N80 тип Q; L-80 тип 1; C90 тип 1
			30ХГМА	К–Л; N80 тип Q; L-80 тип 1; C90 тип 1; T95 тип 1

* Граничные условия эксплуатации приведены ориентировочно, при действии дополнительных осложняющих факторов (ионный состав воды, термобарические условия в скважине, способ добычи и т. д.) агрессивность среды и границы применения типов НКТ могут меняться. В целях учета всех факторов эксплуатации, влияющих на коррозионные процессы, целесообразно направить изготовителю запрос, на основании которого будет проведен анализ условий эксплуатации и подготовлены рекомендации по оптимальному выбору марки стали насосно-компрессорных труб для повышения надежности эксплуатации труб.

- учет осложняющих факторов, прогнозирование возможности солеобразования;
- выбор марки стали и выдача рекомендаций.

В настоящее время разрабатывается так называемый калькулятор марки стали, который в скором времени позволит любому потребителю на сайте производителя получить оценку коррозионных процессов и рекомендации по маркам сталей, применение которых будет оптимально в конкретных условиях эксплуатации.

В целях проверки свойств коррозионно-стойких сталей был проведен ряд лабораторных исследований и стендовых испытаний, в т. ч.:

- в модельных средах, приближенных к условиям эксплуатации, с одной стороны, и к группам коррозионной агрессивности по системе выбора – с другой, с привлечением МНП «Геодата» [2012], ООО «Самарский ИТЦ» [2013], НПАО «НПО «ВНИИТнефть» [2014];
- оценка влияния соляно-кислотной обработки на коррозионную стойкость металла НКТ;

- оценка влияния химического состава стали НКТ на биокоррозию;
- стендовые испытания в среде с CO_2 и H_2S до 6 % (условия ООО «Газпромнефть-Оренбург») при комбинированной нагрузке (растягивающие, изгибающие и нагрузки внутренним давлением среды), ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [2016].

Исследования подтвердили работоспособность системы выбора и высокие эксплуатационные свойства разработанной линейки продуктов.

Основным критерием работоспособности системы выбора являются результаты опытно-промышленных испытаний и подконтрольной эксплуатации, подтверждаемые статистическими данными по наработке на отказ. Анализ результатов эксплуатации более 280 скважин различных нефтяных компаний показал, что применение опытных НКТ в соответствии с предложенной системой выбора позволяет увеличить продолжительность работы подвески в 1,5–6,5 раза по сравнению с НКТ, изготовленными по ГОСТ 633–80 и ГОСТ 31446–2017.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЕК ПРОДУКТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РАМКАХ СИСТЕМЫ ВЫБОРА

В настоящее время в рамках системы выбора материала ОСТГ активно используются несколько видов НКТ групп прочности от К до Л (по ГОСТ 633–80) или от K55 до T95 (по API Spec 5CT «Casing and Tubing») из хромсодержащих марок стали, легированных Nb, Mo, Ti и V: серии Cr1, Cr1SS, Cr3 и Cr5 соответствующих групп коррозионной стойкости S, C, CS и SS.

Особенностью концепции легирования данных сталей, обеспечивающей высокую хладостойкость и коррозионные свойства, является объемное микролегирование V, Ti и Nb, а также увеличение содержания Cr и Mo при пониженном содержании C. Такой подход позволяет в широком диапазоне изменять уровень механических свойств сталей за счет окончательной термической обработки.

Результатом является высокая стойкость стали 18ХМФБ и ее модификаций (серия Cr1) к СКРН при сравнительно высоком уров-

Таблица 2. Коррозионные свойства стали 25ХГБ

Марка стали	Стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением		Скорость общей коррозии в H ₂ S-среде, мм/год	Скорость общей коррозии в CO ₂ -среде, мм/год
	Пороговое напряжение σ_{th} , % от минимального предела текучести σ_{min} (по методу А стандарта NACE TM 0177)	Коэффициент интенсивности напряжений в вершине коррозионной трещины K_{ISSC} , МПа√м (по методу D стандарта NACE TM 0177)		
25ХГБ, группа прочности К	≥ 67	30,5	–	1,159
НКТ, группа прочности К по ГОСТ 633-80 «Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия (с изм. 1–3)»	≥ 67	29,2	0,132	0,605

не механических свойств, а также повышенная стойкость к CO₂-коррозии [3].

Увеличение содержания Cr в сталях 18ХЗМФБ (серия Cr3) [4] и 15Х5МФБ (серия Cr5) [5] позволяет обеспечить дополнительное увеличение стойкости к CO₂-коррозии, но снижает возможности данных сталей противостоять СКРН.

Отличительной особенностью 15Х5МФБ, разработанной совместно с ООО «Самарский ИТЦ», является содержание Cr, значительно увеличивающее устойчивость переохлажденного аустенита, что позволяет при охлаждении на спокойном воздухе получать бейнитно-мартенситные структуры. С одной стороны, это позволяет получать высокие прочностные свойства по режиму «нормализация с последующим отпуском», а с другой – не гарантирует стабильную стойкость к СКРН [2].

Данная концепция легирования имеет ограничения и не позволяет получить стали с высоким уровнем механических свойств (выше С90) с одновременной стойкостью к СКРН. Для дальнейшего увеличения механической прочности с одновременным сохранением стойкости к СКРН необходимо использовать другой подход к легированию.

Концепция легирования сталей типа 30ХГМА (серия Cr1SS) для производства труб групп прочности С90, Т95 по API 5СТ в сероводородостойком исполнении основана на высоком содержании С – 0,35 %

в сочетании с 1,0 % Cr, не более 1,2 % Mn и не более 0,4 % Mo. Сталь 30ХГМА за счет высокого содержания С, Cr и Mn обладает лучшей прокаливаемостью, что положительно сказывается на высокой дисперсности микроструктуры и, соответственно, стойкости к СКРН. Наличие Mo в 30ХГМА также положительно сказывается на стойкости к СКРН, питтинговой коррозии и воздействию кислых сред.

Характеристики данных сталей обуславливают области их применения. В частности, как видно из табл. 1, существующие марки стали применяются в средах с парциальным давлением CO₂ до 0,2 МПа, H₂S – до 1,01 МПа при группах прочности не выше Т95 и Л.

В настоящее время завод продолжает расширять сортамент коррозионно-стойких НКТ для различных условий эксплуатации. Перспективами повышения эксплуатационной надежности НКТ являются:

- модификация серии Cr5-SS в целях повышения коррозионной стойкости в сероводородных средах;
- разработки среднелегированных сталей серии 110-Cr1-SS для OCTG высоких групп прочности, в т. ч. для сред с высоким содержанием сероводорода;
- разработки высоколегированных сталей серии 13Cr для насосно-компрессорных и обсадных труб для сред с высоким содержанием углекислого газа, включая стали высоких групп прочности, стойких к СКРН, – 90-110-13Cr-SS;

- разработки хромникелевых сплавов для сред с высоким содержанием сероводорода и углекислого газа.

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ

OCTG повышенной эксплуатационной надежности из стали марки 25ХГБ

Для сред с преимущественным механизмом углекислотной коррозии при небольших содержаниях CO₂ и H₂S в добываемом продукте (парциальное давление p_{CO_2} – не более 0,03 МПа, p_{H_2S} – не более 0,0035 МПа) разработана новая экономнолегированная сталь марки 25ХГБ для НКТ группы прочности К с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик, получаемых после термомеханической обработки.

К разработке было привлечено ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». Были произведены экспериментальные выплавки опытных составов сталей с различными вариантами микролегирования, осуществлена термомеханическая обработка образцов опытных составов в лабораторных условиях по режимам, приближенным к цеховым, проведены исследования по определению фазового состава сталей, микроструктуры, механических и коррозионных свойств образцов.

По сравнению со сталями, произведенными в соответствии с ГОСТ 632-80 и ГОСТ 633-80, в новой марке стали для повышения стойкости к действию CO₂-коррозии было сни-

Таблица 3. Коррозионные свойства стали Cr5-S

Марка стали	Стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением		Скорость общей коррозии в H ₂ S-среде, мм/год	Скорость общей коррозии в CO ₂ -среде, мм/год
	Пороговое напряжение σ_{th}^* , % от минимального предела текучести σ_{min} (по методу А стандарта NACE TM 0177 (бинарный поиск))	Коэффициент интенсивности напряжений в вершине коррозионной трещины K_{ISSC}^* , МПа/м (по методу D стандарта NACE TM 0177)		
Cr5-S (новая)	81	45,6	0,124	0,074
Cr5 (базовая)*	75	24,1	–	1,517

* По данным протоколов испытаний 2014 г.

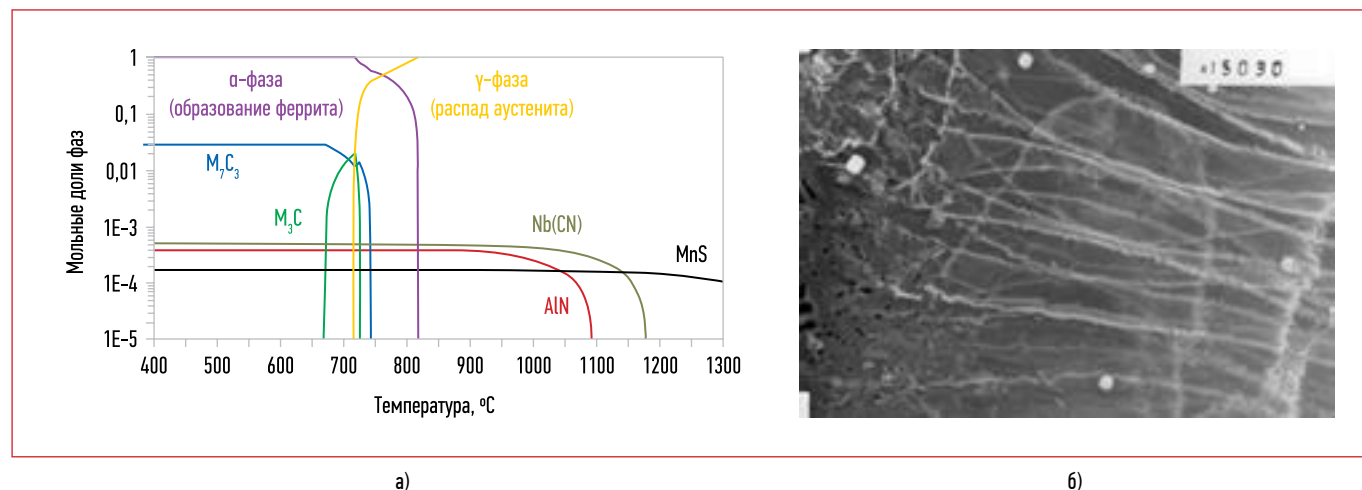


Рис. 4. Термодинамические расчеты (а) и фото карбонитридов ниобия Nb(CN) размером 0,05–0,2 мкм, выявленных с применением просвечивающей электронной микроскопии (б) в стали 25ХГБ

жено содержание С и Мп, увеличено содержание Cr. Микролегирование Nb обеспечивает получение необходимого комплекса эксплуатационных свойств (механических и коррозионных свойств, ударной вязкости).

Термодинамические расчеты и исследования новой марки стали с применением просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали, что в ходе термомеханической обработки труб наблюдается выделение субмикронных и наноразмерных частиц карбонитридов Nb, что обеспечивает получение в процессе термомеханической обработки мелкодисперсной структуры, гарантирующей высокие эксплуатационные свойства (рис. 4).

Исследования коррозионных свойств опытно-промышленной партии труб подтвердили повышенные коррозионные свойства новой стали (табл. 2).

Полученные результаты позволяют рассматривать НКТ из стали 25ХГБ в качестве наиболее экономичного варианта для использования в средах с малым содержанием сероводорода и углекислого газа (группа коррозионной стойкости S по табл. 1).

В настоящее время партия НКТ из стали 25ХГБ отправлена на опытно-промышленные испытания в ПАО «Сургутнефтегаз».

Коррозионно-стойкие OCTG серии Cr5-S

В ходе проведенных исследований и обработки статистических результатов опытно-промышленных испытаний и подконтрольной эксплуатации НКТ из стали типа Cr5 была установлена нецелесообразность применения НКТ из данной марки стали в сероводородсодержащих средах. При использовании в средах с высоким и средним содержанием сероводорода средняя

наработка на отказ не превышает 420 сут, при этом средняя кратность наработки не превышает 1,5 [2].

В связи с этим специалистами ПНТЗ на базе исходной стали была разработана модификация Cr5-S с пониженным содержанием Мп, что позволяет проводить закалочное охлаждение НКТ из Cr5-S в спрейере вместо охлаждения на спокойном воздухе. А это, в свою очередь, существенно увеличивает технологичность термообработки и гарантирует более стабильные свойства и высокую стойкость не только к CO₂-коррозии, но и к СКРН.

Результаты коррозионных испытаний новой модификации в сравнении с базовой сталью 15Х5МФБ свидетельствуют о высокой стойкости к СКРН и общей коррозии в CO₂-средах (табл. 3).

Полученные свойства позволяют расширить область применения данной марки стали и гарантиро-

вать повышение наработки на отказ при использовании в средах со средним содержанием углекислого газа, в т.ч. в присутствии заметных количеств сероводорода (группы коррозионной стойкости С и СS по табл. 1).

Коррозионно-стойкие стали групп высокой прочности (P110SS)

В целях дальнейшего увеличения эксплуатационных свойств в сторону повышения механической прочности при сохранении высокой стойкости к СКРН специалистами ПНТЗ разработана марка стали серии С110 (P110SS).

Новая концепция легирования для С110 (P110SS) предполагает более низкое содержание С, Мп и Сг при увеличении содержания молибдена. Также сталь дополнительно микролегируется Nb и V. Из-за сравнительно низкого содержания углерода материал трубы имеет высокую хладостойкость. Микролегирование Nb позволяет получить небольшой размер исходного аустенитного зерна, что способствует увеличению коррозионной стойкости [6].

В результате была получена сталь, соответствующая по механическим свойствам группе прочности С110, с высокой стойкостью к СКРН (согласно NACE TM 0177 «Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments» пороговое напряжение σ_{th} , определенное по методу А, составляет не менее 85 %; коэффи-



циент интенсивности напряжений в вершине коррозионной трещины K_{ISSC} , установленный по методу D, равен 30,7 МПа√м) при достаточно высокой стойкости к СО₂-коррозии по результатам испытания в модельных средах.

В настоящее время технология изготовления OCTG из новой марки стали находится в стадии промышленного освоения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для решения проблемы коррозии нефтедобывающего оборудования ПНТЗ разработана эффективная система выбора материалов OCTG в коррозионно-стойком исполнении для конкретных условий эксплуатации.

2. Предложенная система выбора позволяет на основании физико-химического состава транспортируемого продукта и основных условий эксплуатации провести оценку агрессивности среды и ре-

комендовать оптимальные стали для данных условий из существующей линейки труб повышенной эксплуатационной надежности производства ПНТЗ.

3. В рамках системы выбора активно применяются несколько новых видов НКТ групп прочности от К до Л (по ГОСТ 633–80) или от K55 до T95 (по API 5CT) из хромсодержащих марок стали, легированных Nb, Mo, Ti и V, серий Cr1, Cr1SS, Cr3 и Cr5 групп коррозионной стойкости S, C, CS и SS.

4. ПНТЗ продолжает расширять сортамент коррозионно-стойких НКТ для различных условий эксплуатации. В настоящее время в стадии опытно-промышленных испытаний находится НКТ из экономнолегированной стали повышенной эксплуатационной надежности 25ХГБ, в стадии промышленного освоения технологии производства – OCTG из сталей Cr5-S и С110 (P110SS).

Литература:

1. Devyaterikova N., Nurmukhametova M., Kharlashin A., Popov Y. Types of Corrosion Damage of Tubing in the Oilfield [Электронный источник]. Режим доступа: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/47/e3sconf_cr18_03001/e3sconf_cr18_03001.html (дата обращения: 10.06.2020).
2. Девятерикова Н.А. Коррозия при добыче нефти и газа. Система выбора материала OCTG для эксплуатации в агрессивных средах и ее практическое применение // Сборник трудов XXIII Международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2018». Челябинск, 2019. С. 132–136.
3. Коррозионно-стойкая сталь для нефтегазодобывающего оборудования: пат. RU 2437954 С1, МПК С22С 38/50, С22С 38/28 / С.Г. Чикалов, В.И. Тазетдинов, С.А. Ладыгин и др.; патентообладатель ОАО «Первоуральский новотрубный завод»; № 2010133671/02, заявл. 11.08.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. 10 с.
4. Коррозионно-стойкая сталь для насосно-компрессорных и обсадных труб и нефтегазодобывающего оборудования: пат. RU 2437955 С1, МПК С22С 38/50, С22С 38/28 / С.Г. Чикалов, В.И. Тазетдинов, С.А. Ладыгин и др.; патентообладатель ОАО «Первоуральский новотрубный завод»; № 2010133673/02, заявл. 11.08.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. 8 с.
5. Коррозионно-стойкая сталь для насосно-компрессорных и обсадных труб: пат. RU 2371508 С1, МПК С22С 38/26, F16L 9/02 / Т.В. Денисова, А.В. Иоффе, В.А. Ревякин и др.; патентообладатель ОАО «Первоуральский новотрубный завод»; № 2008122659/02, заявл. 04.06.2008; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. 6 с.
6. Mohrbacher H. Low-Carbon Metallurgical Concepts for Seamless OCTG Pipe // Energy Materials. 2014. P. 673–678.