

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»



На правах рукописи

Кухарец Александр Анатольевич

**Исследование возможности ремонта трубопроводов для передачи
водорода при повышенных температурах**

Направление подготовки
15.04.01 «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание академической степени магистра

2020

Работа выполнена на кафедре «Технологии сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель

Соболев Борис Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологии сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО, г. Комсомольск-на-Амуре

Рецензент

Жилин Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Защита состоится «02» июля 2020 года в 12:00 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

Автореферат разослан «18» июня 2020 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент



А.В. Свиридов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В нефтехимической промышленности при производстве этилена путем парового крекинга, при производстве аммиака, метанола, водорода и синтетического газа путем парового риформинга основным оборудованием является реакционная печь. Надёжность печи определяется стабильной работой реакционных труб, пигтейлей, коллекторов и других элементов радиантной части печи. Детали печи в период продолжительного времени подвергаются воздействию высоких температур порядка 870 - 1100 °С. В 60-х годах для данных целей начались разработки особых материалов. Разработанные типы и модификации сплавов в основном выпускаются как патентные (фирмами Doncasters Parallooy, Manoir Industries), а не в соответствии со стандартами UNS, ASTM или EN. Трубы изготавливаются путём центробежного литья, модифицированными по технологии HP, а именно материалы, содержащие, по меньшей мере, 25% хрома и 35% никеля, а также микродобавки Nb, Ti и других элементов. Для новых типов сплавов срок эксплуатации ограничивается 100 000 ч. Это ограничение обусловлено наиболее значительными повреждающими факторами: ползучесть, деградация микроструктуры, межзеренное окисление, термоциклическая усталость.

Существует множество металлографических исследований посвященных изучению структуры состаренных HP сплавов (Rampat K., Farrar C., Maharaj C., Marquez A., Khan R., Jenabali J. S. A., Naghikhani M, Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B.). В состоянии поставки микроструктура представляет собой дендриты матричной γ - фазы и эвтектических колоний, располагающихся по границам дендритов и состоящих из γ - фазы и крупных карбидов на основе Cr и Nb.

В ходе эксплуатации установки производства водорода (УПВ) завода АО «ННК-Хабаровский НПЗ» в 2018 г. проведено металлографическое исследование сварного соединения трубы коллектора с тройником коллектора реакторной печи риформинга из сплава MANAURITE 900, в результате которого в одном из четырёх образцов металла коллектора обнаружены микротрещины. В образцах металла тройника коллектора микротрещин не выявлено. Было принято решение о ремонте соединения с применением ручной дуговой сварки покрытыми металлическими электродами. В ходе ремонта столкнулись с интенсивным трещинообразованием. Встал вопрос о разработке технологии ремонта, обеспечивающей простоту сварочных операций и качество сварных соединений.

Целью работы являлось разработка технологии ремонта сварных соединений, установки производства водорода (УПВ), завода АО «ННК-Хабаровский НПЗ», из сплава MANAURITE 900, обеспечивающей надёжность и долговечность оборудования.

В рамках поставленной цели определены следующие задачи:

1. Анализ нормативно-технологической документации по сварке аустенитных жаропрочных сталей и сплавов, проектированию, строительству, эксплуатации и ремонту нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок.
2. Анализ сплава MANAURITE 900 и металла сварных соединений, определение причин коррозионного растрескивания и мероприятий по их устранению.
3. Разработка технологических рекомендаций, способствующих повышению качества сварных соединений и служащих основой для разработки ремонтных технологий в конструкциях из сплава MANAURITE 900, работающих при высокой температуре в водородной среде.

Объектом исследования являются сварные соединения аустенитного жаропрочного сплава MANAURITE 900 коллектора реакторной печи риформинга Н-220-101 установки производства водорода (УПВ) завода АО «ННК-Хабаровский НПЗ»

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлено, что причиной межкристаллитной коррозии в жаропрочных аустенитных сталях и сплавах является интенсивное образование карбидов хрома на границах зерен в температурном интервале 500 – 700 °С, где атомы хрома имеют большую диффузионную подвижность и способность к образованию карбидов. Таким образом, границы и приграничные участки зерен оказываются обедненными атомами хрома, находящимися в твердом растворе.

2. Показано, что стабилизирующего отжига при 850 – 900 °С в течении 3 ч с последующим медленным остыванием на воздухе приводит к обезводороживанию металла и снижает вероятность трещинообразования.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложен режим стабилизирующего отжига при 850 – 900 °С в течении 3 ч с последующим медленным остыванием на воздухе

- предложены оптимальные режимы сварки аустенитного жаропрочного сплава MANAURITE 900 и сварочные материалы для ручной дуговой сварки

- разработаны рекомендации по ремонту сварных соединений установки производства водорода (УПВ) завода АО «ННК-Хабаровский НПЗ» из сплава MANAURITE 900

Личный вклад автора заключается в анализе НТД и литературных источников, планировании и проведении исследований, обработке полученных результатов, составлении технологических рекомендаций.

Публикации. По теме диссертации подготовлены к опубликованию 2 печатные работы в журналах, рекомендованных ВАК и SCOPUS, опубликована статья в сборнике РИНЦ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Диссертация содержит 79 страниц; 40 рисунков; 23 таблицы; список литературы 84 названий.

Основное содержание работы. Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, описывается научная новизна и практическая значимость результатов работы. Обоснована цель работы и задачи исследований.

В первой главе представлен литературный обзор состояния проблемы. Рассмотрены основные дефекты в сварных соединениях установки производства водорода (УПВ) завода АО «ННК-Хабаровский НПЗ» из сплава MANAURITE 900. Произведён анализ причин возникновения дефектов в сварных соединениях.

Во второй главе описываются основные методы и оборудование для проведения исследований. Для микроструктурного анализа применяли микроскоп портативный металлографический МПМ-1КМ. Шлифы готовились непосредственно на поверхности коллектора при помощи углошлифовальной машины и набора абразивных материалов и паст. Химическое травление в 4% растворе азотной кислоты в течение 20 сек. Условия проведения испытаний – температура +20 °С, относительная влажность воздуха 65 %, барометрическое давление – 756 мм ртутного столба. Снимки микроструктуры делались с увеличением 100х. Балл зерна определялся по ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна», шкала 1. Карбидная неоднородность определялась по ГОСТ 8233-56 «Сталь. Эталоны микроструктуры».

Технология ремонта была разработана специалистами АО «ННК-Хабаровский НПЗ» и одобрена НАКС. В качестве нормативной документации использованы СТО 38.17.003 – 2009; СТО 00220368-008 – 2006; ОСТ 26.260.3-2001, сварочные материалы: Thermanit 21/33. Толщина свариваемых деталей 30 мм, диаметр деталей в зоне сварки 300мм. Форма подготовки кромок С5н по СТО 00220368 – 008 – 2006. Визуальный и измерительный контроль выполнен согласно инструкции РД 03-606-03. Объект контроля представляет собой механическую вырезку 1/6 диаметра кольцевого сварного соединения (рисунок 1).

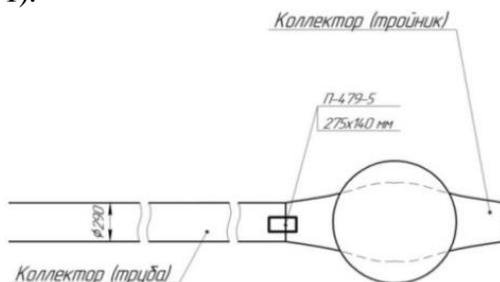


Рисунок 1 - Схема вырезки образца

Химический состав металла определялся спектрометром эмиссионным «Аргон-5СФ» и спектрометром рентгенофлуоресцентным Delta Series DP-2000. Анализ проводился по ГОСТ Р

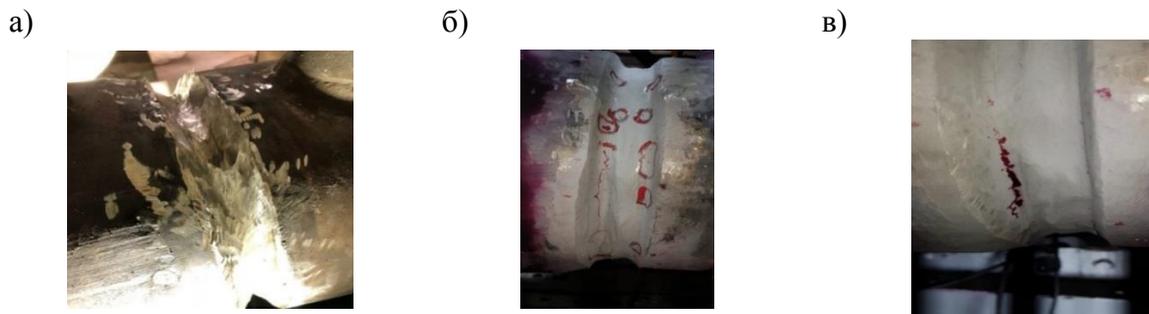


Рисунок 3 - Выявленные дефекты при капиллярной дефектоскопии:
 а – вышлефовка дефектов; б, в – микронадрывы, трещины, поры

Множественная вышлифовка трещин в сварочных слоях, привело к увеличению разделки под сварку (рисунок 3), а также из – за отсутствия возможности соблюдения равномерного порядка сварки корневого и последующих слоёв, вело к неравномерной наплавке металла и к увеличению сечения сварного шва, тем самым провоцируя зарождение внутренних напряжений, как по основному шву, так и в зоне термического влияния.

2. Стабилизирующий отжиг. Принято решение стабилизировать внутреннее напряжения, выполнив термообработку. Отжиг провели по режиму: нагрев до 870 – 900 °С, выдержка 3 часа, охлаждение с нагревателем до 300 °С при скорости охлаждения 50 - 100°С/ч – далее на воздухе. Термообработку выполнили уст. РТ75-6 (шестиканальная)

После термообработки продолжили сварку, проковывая вручную каждый наплавленный валик. После завершения сварки поверхность облицовочного шва (усиления) зачистили, подготовили к цветной дефектоскопии. Грубые дефекты по наружной поверхности отсутствовали, однако, в зоне сплавления и термического влияния обнаружили трещину.

В около шовной зоне дефект выбрали до чистого металла. Общий размер выборки дефекта составил порядка 80 мм.

Выбирая трещину на основном металле тройника коллектора обнаружили шлаковое включение, по всей вероятности образовавшегося в процессе отливки тройника.

Выбрали дефект, поверхность проконтролировали цветной дефектоскопией, приступили к наплавке, с формированием V кромки.

Наплавив кромку со стороны тройника нижнего коллектора заварили корень шва и все последующие слои. Сварное соединение после ремонта отработало в штатном режиме порядка восьми месяцев, далее, выведя установку в ремонт, благополучно заменили коллектор на новый.

В четвертой главе проведено определение структурно-механического состояния сварного соединения коллектора реакторной печи риформинга установки производства водорода из сплава manaurite 900.

В результате визуального и измерительного контроля выявлено, что сварной шов выполнен многопроходной сваркой. Ширина сварного шва неравномерная - 76,2 - 85,1 мм. Обнаружено неполное проплавление корня шва (неполное заполнение разделки) до 9 мм, брызги металла со стороны внутренней поверхности. Размеры образца 275,0 × 140,0 мм, толщина участка трубы коллектора 31,0 - 30,8 мм, толщина участка тройника коллектора 40,0 - 42,0 мм. Внутренняя поверхность покрыта налетом черного цвета.

Результаты химического анализа металла образцов: (ОМ тройника коллектора), (ОМ трубы коллектора), (СШ) представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1 - Результаты химического анализа основного металла образца

В процентах

Наименование	Химический элемент						
	Fe	C	Mn	Si	Ni	Cr	Nb
ОМ тройника	44,40	0,22	0,95	0,98	32,18	20,02	1,01
ОМ трубы	43,14	0,14	1,32	0,82	34,04	19,16	1,15
Manaurite 900	остаток	0,06-0,15	1,00-1,50	0,75-1,50	29,00-37,00	16,00-22,00	+

По результатам химического анализа: металл образца (ОМ тройника коллектора) не соответствует заявленной марке сплава Manaurite 900. Выявлено высокое содержание С и низкое содержание Мп; металл образца (ОМ трубы коллектора) соответствует заявленной марке сплава Manaurite 900.

По результатам химического анализа металл образца СШ не соответствует химическому составу электрода SAFINOX B017 (сертификат качества № 1004580) и основному металлу. По химическому составу, металл сварного шва соответствует никелевому сплаву.

Таблица 2 - Результаты химического анализа металла сварного шва

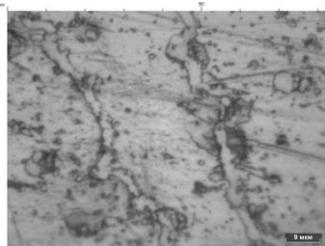
В процентах

Наименование	Химический элемент							
	С	Мп	Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Nb
Сварной шов	0,06	0,60	57,20	19,50	9,60	8,50	0,35	0,14
Проволока УТР А 21/33Мп	0,14	4,5	33,00	21,00	-	-	-	1,30
Электрод SAFINOX B017 (сертификат качества № 1004580)	0,11	1,13	35,00	21,31	0,02	0,01	-	0,98

В результате металлографического исследования на нетравленных шлифах основного металла тройника коллектора в центральной части сечения трубы и основного металла трубы коллектора несплошностей не обнаружено.

Микроструктура основного металла как тройника (рисунок 4, а), так и трубы коллектора (рисунок 4, б) литая, в центральной части сечения представляет собой дендриты матричной γ - фазы (аустенит) на основе Fe-Cr-Ni, окруженные эвтектикой, состоящей из первичных карбидов и γ - фазы, а так же вторичные дисперсные неметаллические включения (карбиды, интерметаллиды), которые распределены в матричной фазе.

а)



б)

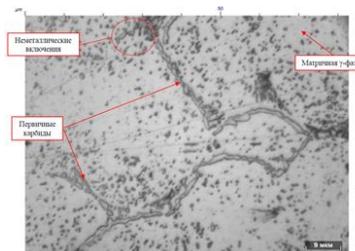
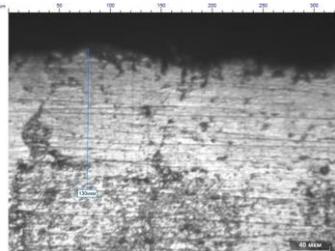


Рисунок 4 - Микроструктура в центральной части сечения тройника (а) и трубы коллектора (б), $\times 400$

Со стороны внутреннего края сечения трубы тройника имеется слой межкристаллитной коррозии, а так же обезуглероженный слой толщиной до 130 мкм (рисунок 7, а). Под дефектным слоем микроструктура существенно не отличается от центральной части и представляет собой матричную γ - фазу, первичные карбиды и вторичные дисперсные неметаллические включения. Аналогичную картину имеет микроструктура со стороны внутреннего края трубы коллектора (рисунок 5, б).

а)



б)

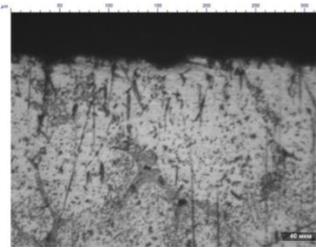
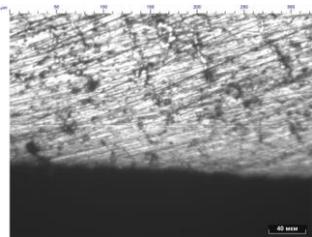


Рисунок 5 - Микроструктура со стороны внутреннего края сечения тройника (а) и трубы коллектора (б), $\times 100$

Микроструктура металла тройника (рисунок 6, а) и трубы коллектора (рисунок 6, б) со стороны наружного края существенно не отличается от центральной части сечения и представ-

ляет собой матричную γ - фазу, первичные карбиды и вторичные дисперсные неметаллические включения.

а)



б)

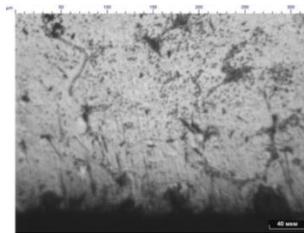
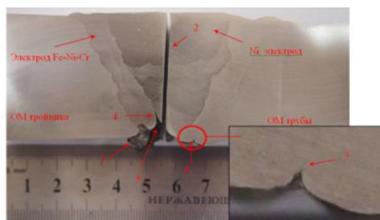


Рисунок 6 - Микроструктура со стороны наружного края сечения тройника (а) и трубы коллектора (б), $\times 100$

Сварное соединение выполнено многопроходной сваркой как минимум двумя различными по составу электродами. В сварном шве выявлены следующие дефекты:

- непровар (неполное заполнение разделки) - до 9 мм (см. рисунок 9, позиция 5 и рисунок 11 позиция 2);
- несплавление с основным металлом (см. рисунок 9, позиция 1);
- несплавление между валиками (см. рисунок 7 позиция 4 и рисунок 8 позиция 2);
- поры в диаметре до $\sim 0,7$ мм (см. рисунок 7 позиция 2 и рисунок 8 позиция 1);
- микротрещина (см. рисунок 9 позиции 3) V-образной формы от несплавления между валиками;
- брызги металла со стороны корня шва (рисунок 9 позиция 1).



1 - брызги металла; 2 - пора; 3 - микротрещина; 4 - несплавление; 5 – непровар
Рисунок 7 - Макрошлиф образца (СШ + ОМ тройника коллектора) и (СШ + ОМ трубы коллектора)

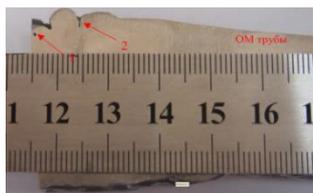


Рисунок 8 - Дефекты в образце П-479-5 (СШ + ОМ трубы коллектора)



Рисунок 9 - Дефекты в корне шва образца П-479-5

В дополнение к макроисследованию на образце (СШ) произведено микроисследование на оптическом и растровом микроскопах. На нетравленном шлифе с внутреннего края со стороны трубы обнаружена трещина на глубину до 1 мм, распространяющаяся от несплавления (рисунок 10).

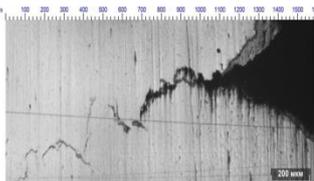


Рисунок 10 - Несплавление и микротрещина в сварном шве со стороны внутреннего края, шлиф нетравлен, $\times 50$

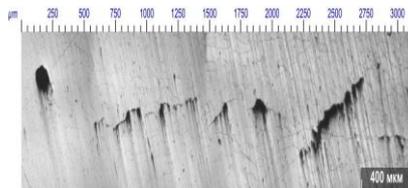


Рисунок 11 - Микротрещина и пора в сварном шве, шлиф нетравлен, $\times 50$

Внутри сварного шва обнаружены крупные поры, достигающие размеры 435x135 мкм. В трех мм от внутреннего края поверхности сварного шва наблюдается трещина, распространяющаяся внутрь шва на глубину до 2,5 мм и пора, диаметром до 120 мкм (рисунок 11).

После травления, в структуре сварного шва можно выделить три зоны (рисунок 12). Проведен элементный микроанализ зон. Электронное изображение исследуемых зон представлено на (рисунке 13). В (таблицах 3 и 4) представлены результаты элементного анализа. Из результатов элементного анализа сварного шва следует, что в центральной части (зона 1) сварного шва применялся электрод на никелевой основе, на периферии (зоны 2 и 3) - близкие по составу к основному металлу. Состав матричной γ - фазы и эвтектических карбидов в сварном шве зоны Fe-Ni-Cr аналогичен основному металлу.

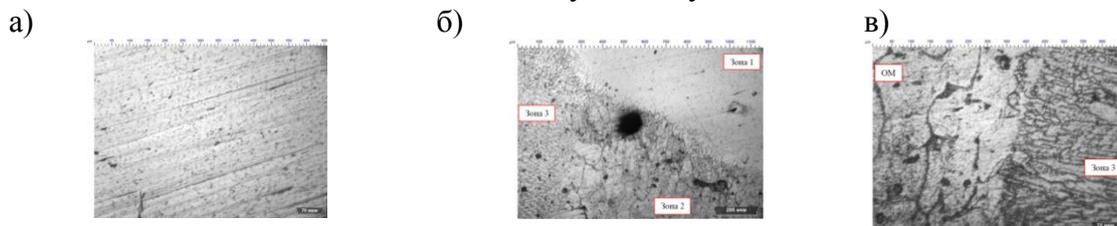


Рисунок 12 - Микроструктура сварного шва, $\times 50$:
 а - зона 1, центральная часть; б - границы между зонами 1, 2 и 3;
 в - граница между зоной 3 и основным металлом

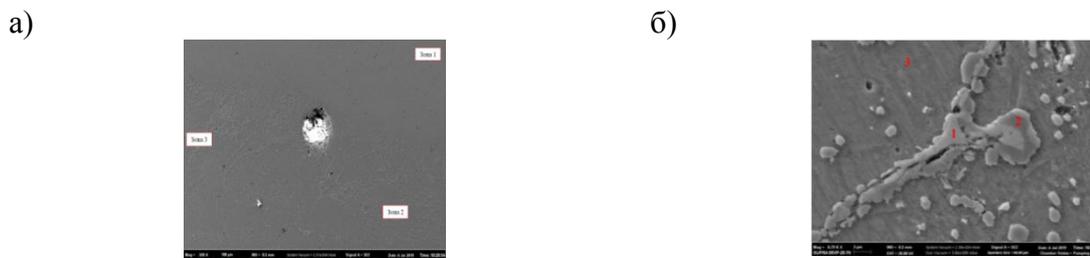


Рисунок 13 - Электронное изображение микроструктуры сварного шва зоны Fe-Ni-Cr с местами элементного анализа:
 а – по зонам; б – по точкам

Таблица 3 - Результаты элементного микроанализа зон сварного шва

В процентах

Наименования	Химические элементы						
	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Зона 1	0,54	19,69	4,31	9,11	3,53	59,46	3,36
Зона 2	1,06	20,59	2,49	43,59	0,30	31,96	-
Зона 3	1,09	19,56	1,14	46,73	0,38	31,10	-
Manaurite 900	0,75/1,50	16,00/22,00	1,00/1,50	остаток	-	29,00/37,00	-
UTP A 21/33Mn	-	21,00	4,5	-	-	33,00	-
SAFINOX B017	-	21,31	1,13	-	0,02	35,00	0,01

На нетравленном шлифе образца П-479-5 (СШ) со стороны тройника с внутреннего края обнаружена трещина на глубину до 900 мкм, распространяющаяся от несплавления, а также поры диаметром до 230 мкм (рисунок 14, а). Внутри сварного шва обнаружена пора размером 135 \times 125 мкм (рисунок 14, б).

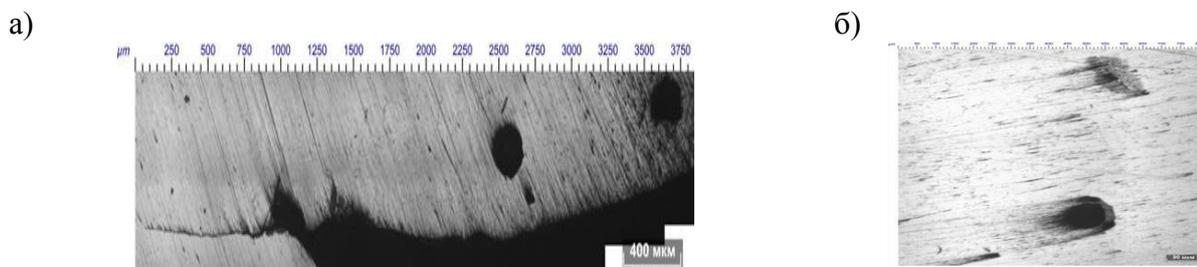


Рисунок 14 - Несплавление, микротрещина и поры в сварном шве, шлиф нетравлен, $\times 50$
 а- с внутреннего края шва; б – внутри шва
 После травления, в структуре сварного шва можно выделить 2 зоны (рисунок 15).

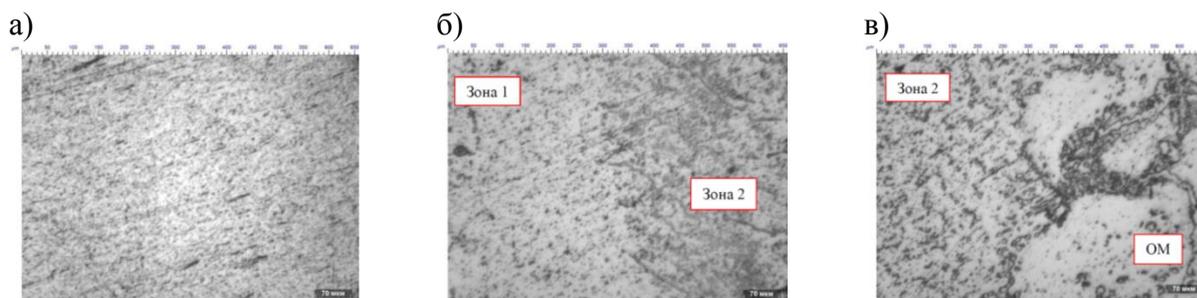


Рисунок 15 – Микроструктура сварного шва, $\times 50$:
 а - зона 1, центральная часть; б - граница между зонами 1 и 2;
 в - граница между зоной 2 и основным металлом

Внутри зоны 2 обнаружены участки структуры γ - фазы с двойниками с четко выраженными границами (рисунок 16), что свидетельствует о резком охлаждении этих микроучастков во время сварки.

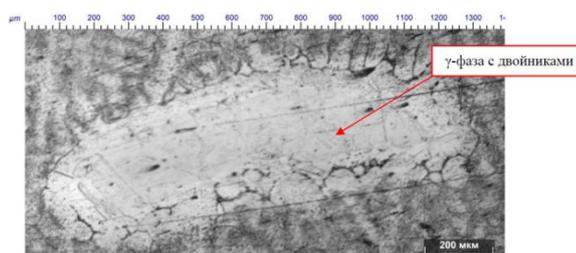


Рисунок 16 – Микроструктура зоны 2 с участками γ - фазы с двойниками

Таким образом, микроструктура металла коллектора соответствует структуре литых хромоникелевых сплавов после эксплуатации в агрессивной среде при высоких температурах. Результаты фазового анализа согласуются с литературными данными исследования сплавов типа НР: в центральной части сечения - дендриты матричной γ - фазы (твердый раствор на основе Fe-Cr-Ni) и колонии первичных эвтектических карбидов по границам дендритов на основе Cr, остаточных карбидов Nb, G - фазы, а также вторичных дисперсных карбидов хрома и ниобия.

Со стороны внутренней поверхностей металла коллектора - слой оксидов, преимущественно хрома. Под слоем оксидов - межкристаллитная коррозия и обезуглероженный слой, состоящий из матричной γ - фазы, в значительной степени обеднённой хромом.

Микроструктура сварного шва коллектора состоит из несколько зон: зона, соответствующая электроду на основе Fe-Cr-Ni и зона, соответствующая электроду на основе Ni. Внутри зоны соответствующей электроду на основе Fe-Cr-Ni обнаружены участки структуры γ - фазы с двойниками с четко выраженными границами, множество пор, несплавлений и микротрещин, распространяющихся от несплавлений и по первичным карбидам. Качество сварного шва неудовлетворительное вследствие обнаруженных макро- и микродефектов.

Средний результат замеров твердости в образце П-479-5 (труба коллектора) составляет 141 НВ; в образце П-479-5 (тройник коллектора) составляет 135 НВ. Результаты замеров твердости указывают на то, что на всех трубах произошло сквозное обезуглероживание со стороны

внутренней и наружной поверхностей, более ярко выраженное со стороны наружной поверхности.

Результаты механических испытаний и сравнение с требованиями на материал представлены в (таблице 5).

Характеристики прочности сварного соединения образца П-479-5 не ниже требований для основного металла сплава Manaurite 900. При проведении испытаний на растяжение сварного соединения разрушение во всех испытуемых образцах произошло в металле сварного шва, что говорит о разнородности металла шва основному металлу. Стоит отметить, что разрушение двух образцов из шести произошло по дефекту в сварном шве.

Таблица 5 - Механические свойства металла образца (СШ)

Температура испытаний, °С		Место разрушения ОМ, МШ, ЗТВ*	Временное сопротивление, МПа	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
+20	min	МШ	630,8	89,3
	max		631,1	113,2
	среднее		631,0	100,2
+970	min		133,1	-
	max		155,2	-
	среднее		144,2	-
ОМ для сплава Manaurite 900 при +20 °С			510,0	-
ОМ для сплава Manaurite 900 при +900 °С			110,0	-

*Примечание: ОМ - основной металл, МШ - металл сварного шва, ЗТВ - зона термического

Результаты комплексного исследования металла сварного соединения тройника коллектора реакторной печи риформинга Н-220-101 установки производства водорода (УПВ) завода АО «НКК-Хабаровский НПЗ» (П-479-5):

1 По результатам химического анализа: основной металл образца тройника коллектора не соответствует заявленной марке сплава Manaurite 900 вследствие высокого содержания С и низкого содержания Мп; основной металл образца трубы коллектора соответствует заявленной марке сплава Manaurite 900. По химическому составу, металл сварного шва соответствует электроду на основе Ni.

2 Микроструктура металла коллектора соответствует структуре литых хромоникелевых сплавов после эксплуатации в агрессивной среде при высоких температурах. Результаты фазового анализа согласуются с литературными данными исследования сплавов типа НР: в центральной части сечения - дендриты матричной γ - фазы (твердый раствор на основе Fe-Cr-Ni) и колонии первичных эвтектических карбидов по границам дендритов на основе Cr, остаточных карбидов Nb, G-фазы, а также вторичных дисперсных карбидов хрома и ниобия.

3 Со стороны внутренней поверхностей металла коллектора - слой оксидов, преимущественно хрома. Под слоем оксидов - межкристаллитная коррозия и обезуглероженный слой, состоящий из матричной γ - фазы, в значительной степени обедненной хромом.

4 По результатам макроанализа сварного соединения установлено, что сварной шов выполнен многопроходной сваркой как минимум двумя различными по составу электродами. В сварном шве выявлены следующие дефекты: непровар (неполное заполнение разделки); несплавление с основным металлом, несплавление между валиками; поры в диаметре до ~ 0,7 мм; микротрещина V - образной формы; брызги металла со стороны корня шва.

5 Микроструктура сварного шва коллектора состоит из нескольких зон: зона, соответствующая электроду на основе Fe-Cr-Ni, и зона, соответствующая электроду на основе Ni. Внутри зоны, соответствующей электроду на основе Fe-Cr-Ni, обнаружены участки структуры γ - фазы с двойниками с четко выраженными границами, множество пор, несплавлений и микротрещин, распространяющихся от несплавлений и по первичным карбидам. Качество сварного шва неудовлетворительное вследствие обнаруженных макро- и микродефектов.

6 Характеристики прочности сварного соединения не ниже требований стандарта на ма-

териал для основного металла сплава Manaurite 900 [26]. При проведении испытаний на растяжение сварного соединения разрушение во всех испытуемых образцах произошло в металле сварного шва, что говорит о разнородности металла шва основному металлу. Разрушение двух образцов из шести произошло по дефекту в сварном шве.

Общие выводы

1. Продолжительная работа соединения при высокой температуре в водородной среде привело к наводороживанию металла, его охрупчиванию и накоплению внутренних напряжений. Такое явление существенно снижает свариваемость и приводит к вероятности трещинообразования.
2. Перенос технологии сварки без предварительного подогрева и последующей термообработки, что рекомендуется для нового металла, на ремонт приводит к образованию трещин даже при минимальном дуговом воздействии.
3. Термообработка по режиму стабилизирующего отжига: нагрев до 870 – 900 °С, выдержка 3 часа, охлаждение с нагревателем до 300 °С при скорости охлаждения 50 - 100°С/ч – далее на воздухе существенно снижает трещинообразование и позволяет добиться удовлетворительного качества наплавляемого металла.
4. Проковка наплавленных валиков снижает внутренние напряжения и также снижает трещинообразование в сварном шве и зоне термического влияния.
5. Дополнительные операции продувки трубы защитными газами (аргон и азот) при ручной дуговой сварке с целью снижения дефектности шва не дают положительного результата.
6. Литой тройник коллектора имеет литейные дефекты – шлаковые включения, которые могут быть причинами как наследственной дефектности (шлаковые включения в швах), так и трещинообразования, так как не имеют сфероидальной формы, следовательно, являются концентраторами напряжений.
7. В качестве рекомендации предлагается перед процедурой сварки, после стабилизирующего отпуска, проводить исследования уровня наводороживания металла трубопровода по известным методикам.

Рекомендации

1. Производить контроль над рабочими параметрами среды и уходящих дымовых газов в соответствии с проектной документацией.
2. Во время плановых и внеплановых остановок проводить внутренние и внешние проверки на различной стадии деформации ползучести в соответствии с проектной документацией.
3. Не допускать отклонений работы горелок, следить за условием потока газа и его составом.
4. Оценивать влияние высокотемпературной коррозии.
5. Выполнять сварку состаренных сплавов Manaurite в строгом соответствии с разработанной технологией. Усилить контроль наплавленного металла неразрушающими способами.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- 1 Кухарец, А. А. Определение структурно-механического состояния сварного соединения коллектора реакторной печи риформинга установки производства водорода из сплава MANAURITE 900/ П.В. Бахматов, Соболев Б.М., // Территория нефтегаз. – 2020 - № - С.
- 2 Кухарец, А. А. Структура и свойства ремонтного сварного соединения коллектора реакторной печи риформинга установки производства водорода из сплава MANAURITE 900/ П. В. Бахматов, Б. М. Соболев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2020 г. : в 4 ч. / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – Ч. 1. – С 80-82. ISBN 978-5-7765-1382-4 (Ч. 1) ISBN 978-5-7765-1380-0