

**Короткий М. М., Бахматов П. В.**  
**M. M. Korotkiy, P. V. Bakhmatov**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА РЕАКТОРНОЙ ПЕЧИ РИФОРМИНГА УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ИЗ СПЛАВА MANAURITE 900**

**DETERMINATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL STATE OF WELDED JOINT OF MANIFOLD OF REACTOR FURNACE REFORMING UNIT FOR HYDROGEN PRODUCTION FROM THE MANAURITE 900 ALLOY**

**Короткий Михаил Михайлович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

**Mikhail M. Korotkiy** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department «Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Аннотация.** Актуальность данной работы заключается в том, что сплав MANAURITE 900 редко используется на территории России. Вследствие этого мало сведений как об основном материале, который поставляется заводом-изготовителем, так и о технологии сварки на предприятии, непосредственно монтирующем и эксплуатирующем конструкции из данного материала. Также отсутствуют сведения о ремонтных технологиях конструкций из данного сплава, учитывающих особенности эксплуатации конструкции. В работе по результатам экспериментальных исследований сформированы рекомендации по необходимым мероприятиям получения ремонтных сварных соединений удовлетворительного качества.

**Summary.** The relevance of this work lies in the fact that the MANAURITE 900 alloy is rarely used in Russia. As a result, there is little information both about the base material that is supplied from the manufacturer, and about the welding technology, which is written by the enterprise where the structure made from this material is directly installed and operated. There is also no information about repair technologies for structures made from this alloy, not to mention repair technology based on the operating characteristics of the structure. In this work, based on the results of experiments and research, recommendations are formed on the preliminary measures that are necessary to obtain repair welded joints of satisfactory quality.

**Ключевые слова:** установка производства водорода, реакторная печь риформинга, металл сварного шва, MANAURITE 900, испытания, структура, дефекты.

**Key words:** hydrogen production plant, reactor reforming furnace, weld metal, MANAURITE 900, testing, structure, defects.

УДК 621.791.019

**Введение.** Ввиду нераспространённости сплава MANAURITE 900 и производства конструкций из этого сплава за пределами территории России, относительно малого времени и опыта его использования, небольшой области применения возникает сложность изучения данного материала после продолжительной эксплуатации.

Данное исследование дополняет сведения о влиянии структуры металла, сформированной технологическим циклом изготовления трубы, на формирование сварного соединения, а также

влияние долгой эксплуатации в среде водорода и высоких температур на качество ремонтного сварного соединения.

**Методы и материалы.** Для исследования использовали материал коллектора под реакторной печью реформинга для производства водорода на АО «ННК-Хабаровский НПЗ».

Для разделения конструкции использовали ленточный станок HBS-1319V и полотно bahco sandflex cobra 3851-27-0.9-3/4. Станок обладает возможностью подачи СОЖ во избежание изменения в структуре металла от нагрева при интенсивном механическом воздействии на него.

Химический анализ проводили при помощи оптико-эмиссионного спектроанализатора Q4 TASMAR.

Для определения механических характеристик образцов при испытании на статическое растяжение использовали испытательную машину INSTRON 3382.

Для изготовления сварных образцов применяли аппарат аргоно-дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона OZAS FAL TIG – 400 AC/DC.

Сплав MANAURITE 900 используется в нефтехимическом производстве в качестве газоотводящих труб; для листовых деталей установок, которые работают при высоких температурах (700...850 °С) длительное время и с таким же сроком службы. Преимущественно применяется в газоперерабатывающей и нефтеперерабатывающей промышленности для производства водорода и аммиака [3].

Химический состав MANAURITE 900 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав MANAURITE 900

С	Si	Mn	Ni	S	P
До 0,1...0,18	До 0,5...1,5	До 1,5	30,0...35,0	До 0,03	До 0,03
Cr	Nb	Cu	Mo	Sn	Pb
19,0...23,0	0,8...1,2	До 0,25	До 0,5	До 0,01	До 0,01

Механические свойства материала MANAURITE 900 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства материала MANAURITE 900

Температура $T$ , град	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$ , МПа	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·град)	Плотность материала $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельное электро-сопротивление $R \cdot 10^{-9}$ , Ом·м	Коэффициент температурного расширения $A \cdot 10^6$ , 1/град
100	162 000	13	8020	600	16,9...20,1
820	-	25	-	-	-

Технология ремонта разработана специалистами АО «ННК-Хабаровский НПЗ» и одобрена Национальным агентством качества сварки (НАКС). В качестве нормативной документации использованы СТО 38.17.003-2009; СТО 00220368-008-2006; ОСТ 26.260.3-2001, сварочные материалы: Thermanit 21/33So. Толщина свариваемых деталей 30 мм, диаметр деталей в зоне сварки 300 мм. Форма подготовки кромок С3н по СТО 00220368-008-2006 (см. рис. 1). Расчётное количество валиков 28...36. Режимы сварки: диаметр электрода  $\varnothing$  3...4 мм, сварочный ток при обратной полярности 100...120 А. Схема раскладки валиков указана на рис. 2. Источник питания – выпрямитель инвертор Caddy™ Arc 151i со сварочным генератором ESAB KHM 351 YS [6].

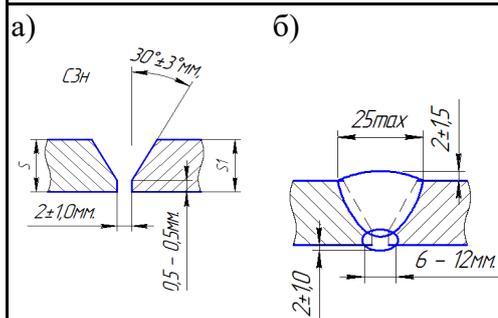


Рис. 1. Размеры сварного соединения до (а) и после сварки (б)

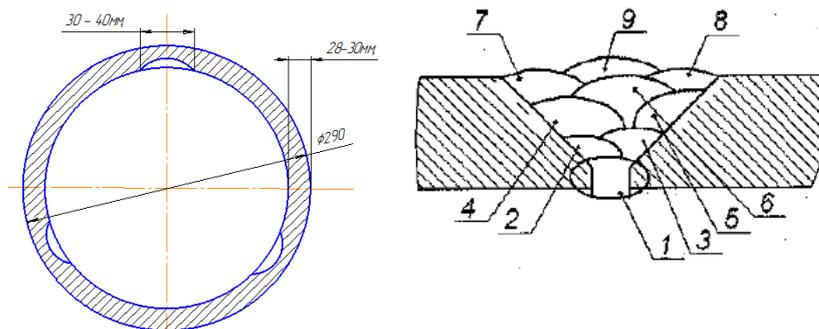


Рис. 2. Схема расположения прихваток и раскладки валиков многопроходного шва

Сварка корневого и последующих слоёв сопровождалась дефектами, такими как микронадрывы, трещины, поры. Дефекты выбирали механическим способом до полного удаления, местами удаляя сквозным пропиливанием корневой металл шва, вышлифовывая порядка 85...90 % сварного шва (см. рис. 3), и так каждый последующий проход, поддерживая межслойную температуру не более 100 °С (температуру выдерживали согласно ОСТ 26.260.3-2001, СТО 00220368-008-2006) [5].



Рис. 3. Корневой валик стыкового соединения

Принято решение стабилизировать внутренние напряжения, выполнив стабилизирующий отжиг согласно подпункту 5.1.26 СТО 00220368-019-2017 по режиму: нагрев до 870...900 °С, выдержка 3 ч, охлаждение с нагревателем до 300 °С при скорости охлаждения 50...100 °С/ч, далее на воздухе) с целью снятия остаточных сварочных напряжений. Термообработку выполнили установкой РТ75-6 [1].

Наплавив кромку со стороны тройника нижнего коллектора, заварили корень шва и все последующие слои (см. рис. 4).

Сварное соединение после ремонта отработало в штатном режиме порядка восьми месяцев, наружных дефектов на поверхности шва и зоны термического металла не выявлено, далее, выведя установку в ремонт, благополучно заменили коллектор на новый [6].

Для выявления количества фаз и расширения металла был изготовлен образец на дилатометр. Результаты дилатометрии представлены на рис. 5 [4].

Исследования на дилатометре показали: сталь имеет однофазную структуру до 1200 °С.

Для испытания на разрыв изготовили образец из сварной конструкции, в состав которой входят основной металл коллектора, основной металл тройника и сварной шов.

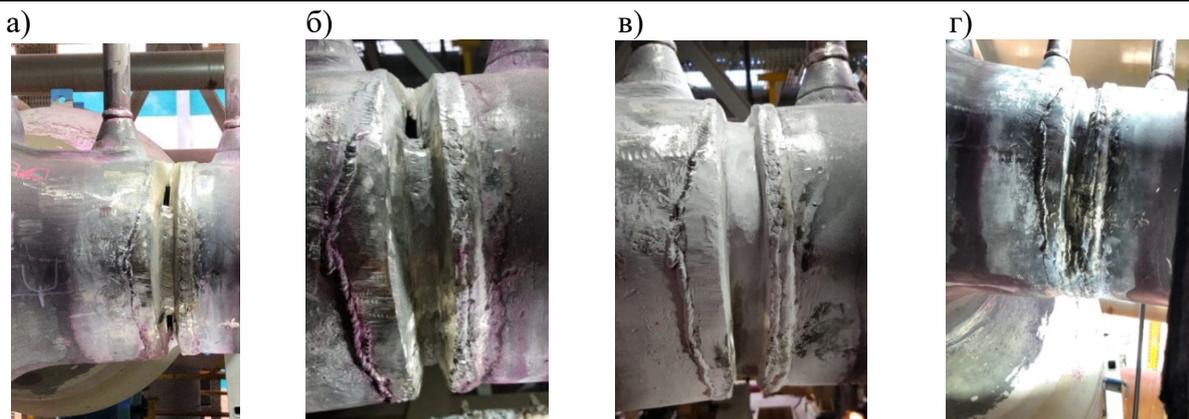


Рис. 4. Этапы заполнения кромок: а – первый слой; б – второй слой; в – третий слой; г – четвёртый слой

В результате испытаний получили график, который изображён на рис. 6. Образец разрушился по основному металлу (см. рис. 7) [4].

По результатам испытаний предел прочности составил 119,3 МПа, что сильно отличается от характеристик, заявленных заводом-изготовителем – 329 МПа [4].

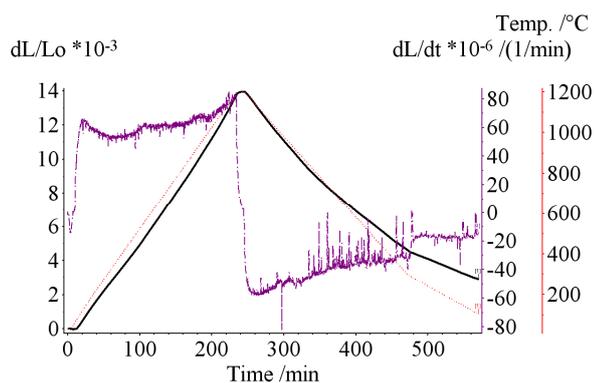


Рис. 5. Дилатограмма основного металла

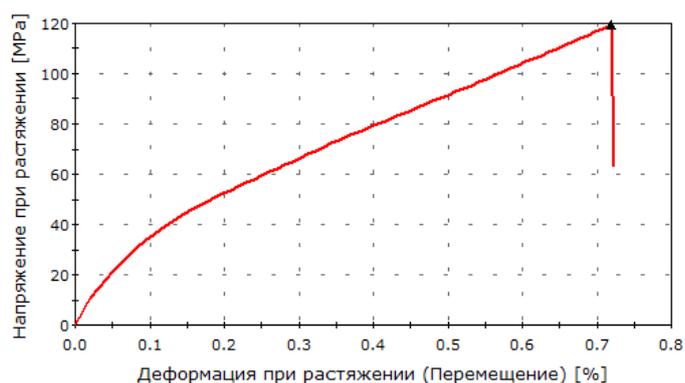


Рис. 6. График напряжения при растяжении

Для сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов были изготовлены образцы из металла коллектора (см. рис. 8).

После сварки в околошовной зоне, вдоль всего корня шва, образовалась холодная трещина (см. рис. 9).



Рис. 7. Образец после статического растяжения



Рис. 8. Образцы для сварки



Рис. 9. Дефект в виде трещины вдоль всего корня шва



Рис. 10. Доломанный образец

После сварки обнаружены трещины в основном металле в зоне термического влияния (см. рис. 9). Произвели долом (см. рис. 10), после исследовали плоскость разлома на РЭМ (см. рис. 11-13).

На рис. 11 видна мелкозернистая структура – место зарождения горячей трещины, место пересечения дендритов основного металла и металла шва [4].

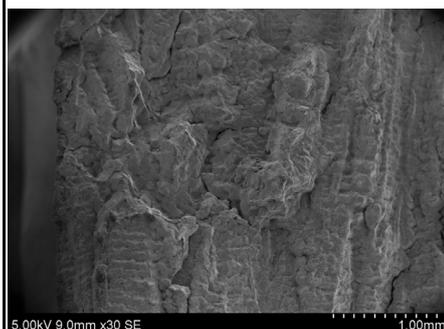


Рис. 11. Место зарождения трещины

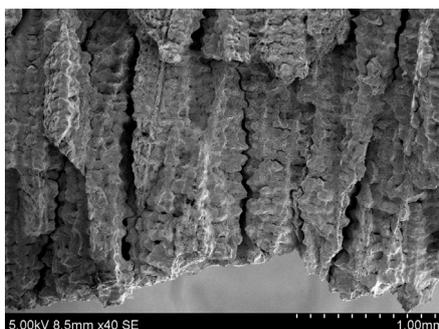


Рис. 12. Зона долома, верхний валик

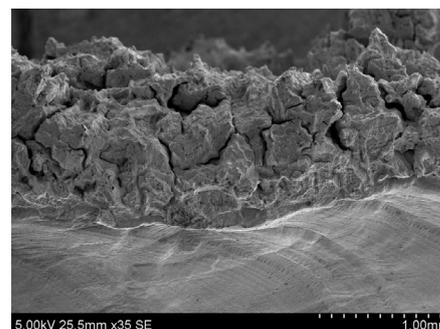


Рис. 13. Граница между основным металлом и металлом шва

Ближе к шву наблюдается мелкозернистая структура, по мере удаления от шва размер зёрен увеличивается (см. рис. 13).

Дендриты направлены в одну сторону, по направлению от внешней стенки к внутренней, такая структура характерна для центробежного литья [4].

Для микроанализа структуры подготовили образцы и залили в эпоксидный клей.

Сделали химический анализ основного металла и металла шва, места обозначены на рис. 14-16, результаты представлены в табл. 3, 4, 5.

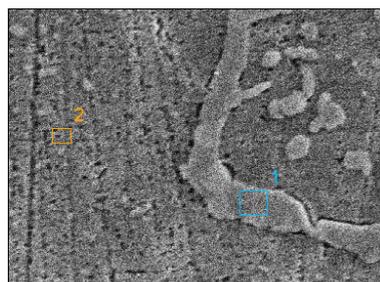


Рис. 14. Основной металл

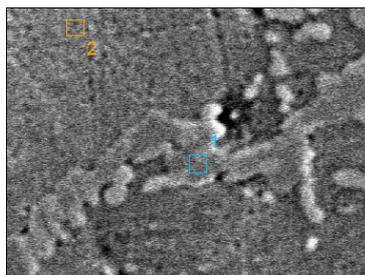


Рис. 15. Основной металл

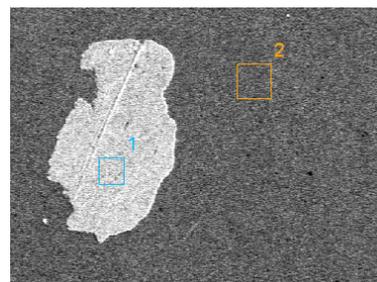


Рис. 16. Металл шва

Таблица 3

## Химический состав (зоны на рис. 14)

В процентах

Si	Cr	Mn	Fe	Ni
зона 1				
1,89	60,05	-	18,31	19,74
зона 2				
0,99	19,41	1,53	44,65	33,42

Таблица 4

## Химический состав (зоны на рис. 15)

В процентах

Si	Cr	Nb	Fe	Ni
зона 1				
4,41	64,40	11,09	-	20,09
зона 2				
-	18,97	-	43,95	37,08

Таблица 5

## Химический состав (зоны на рис. 16)

В процентах

Cr	Fe	Ni	In
зона 1			
3,86	5,11	-	91,03
зона 2			
25,60	45,69	28,72	-

В межзёрном пространстве наблюдаются увеличение хрома в 2...2,5 раза и превышение количества никеля. Предположительно, эти элементы постепенно выделялись из зёрен в межзёрное пространство во время всего периода эксплуатации, что со временем привело к образованию хрупкой  $\sigma$ -фазы. Также в металле шва были обнаружены включения индия [4].

**Выводы.** Основной причиной образования трещин является способ изготовления труб, а именно центробежное литьё, вследствие чего образовалась крупнозернистая дендритная структура. После длительной работы в межзёрное пространство выделилась хрупкая  $\sigma$ -фаза с высоким содержанием хрома, которая при минимальных дуговых воздействиях разрушается по границам зёрен, вследствие чего образуются трещины.

Перед сваркой для восстановления пластичности рекомендуется произвести термическую обработку: нагреть коллектор до 1000 °С, когда  $\sigma$ -фаза становится неустойчивой и растворяется в аустените, выдержать 3-5 ч при этой температуре и охладить. Также при снижении температуры необходимо ускорять охлаждение при достижении 875 °С и заканчивая 650 °С для избежания повторного выделения  $\sigma$ -фазы в межкристаллитное пространство.

В случае невозможности произвести термическую обработку, необходимо производить предварительный подогрев свариваемых кромок для увеличения пластичности, уменьшения вероятности образования трещин и образования более однородной структуры металла шва.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кухарец, А. А. Структура и свойства ремонтного сварного соединения коллектора реакторной печи реформинга установки производства водорода из сплава MANAURITE 900 / А. А. Кухарец, П. В. Бахматов, Б. М. Соболев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре,

06-10 апреля 2020 г. В 3 ч. Ч. 1 / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – С. 71-74.

2. Макаров, Э. Л. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 487 с.

3. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for reformer furnace tubes. History of evolution // Archives of Foundry Engineering. – 2011. – V. 11. – № 2. – P. 47-52.

4. Короткий, М. М. Влияние аргонодуговой сварки сплава MANAURITE 900 на образование холодных трещин / М. М. Короткий, П. В. Бахматов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 года. В 4 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – С. 73-75.

5. Кухарец, А. А. Опыт ремонта элемента трубопровода для высокотемпературной подачи водорода в условиях нефтеперерабатывающего производства: автореф. ... дис. магистра / Кухарец Александр Анатольевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2020. – 16 с.

6. СТО 00220368-088-2006. Изготовление деталей и узлов из коррозионностойких сплавов на железоникелевой и никелевой основе, разнородных соединений и двухслойных сталей с плакирующим слоем из сплавов марок 06ХН28МДТ, ХН65МВ, Н70МФВ-ВИ. Типовой технологический процесс. – Введ. 2007-01-01. – Волгоград: ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры», 2006. – 49 с.