

Этапы работы

Определение требований к трубной продукции и листовому прокату

1 этап

Разработка технологии производства листового проката для сварных труб большого диаметра из водородостойкой стали в условиях АО «Уральская Сталь», производство и отгрузка опытной партии листов.

2 этап

Разработана технология изготовления труб предназначенных для транспортировки водорода либо МВС. Определены основные параметры микроструктуры сварного соединения, которые должны обеспечивать стойкость к воздействию водорода.

Разработаны технологические карты на производство трубы.

Производство труб.

3 этап

Выполнение статических автоклавных испытаний в метано-водородной среде под давлением до 10,0 МПа. Выполнение динамических автоклавных испытаний образцов в метано-водородной среде под давлением до 10,0 МПа.

4 этап

положительное заключение СПбПУ о возможности применения труб из водородостойкой стали при транспортировке метано-водородной смеси.

Введение

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р утвержден план мероприятий по развитию водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года. Однако, водородная энергетика находится еще на ранней стадии развития. Технические возможности декарбонизации соседствуют со сложностями хранения и транспортировки водорода потребителям.

Одной из основных проблем использования водорода в качестве «зеленого» источника энергии является его негативное воздействие на сопротивление разрушению металлических конструкций, таких как трубопроводы и сосуды высокого давления, входящие в систему производства и транспортировки этого газа. В виду этого актуальной задачей отечественной промышленности является **разработка сталей для транспортировки водорода и водородосодержащих газов**, которые решали бы перечисленные проблемы для обеспечения возрастающей потребности водорода в промышленности и энергетике.

С целью обеспечения перспективной потребности промышленности и энергетики в трубах для транспортировки водорода и водородосодержащего газа АО «Уральская Сталь» в 2022 году приступило к разработке технологии производства штрипса с повышенными требованиями.

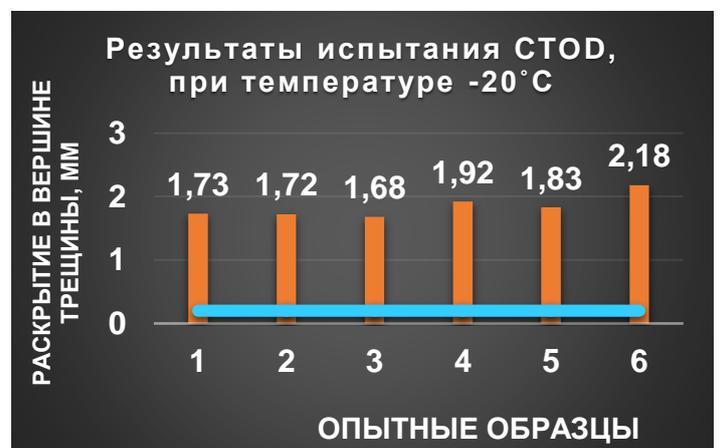


Производство водородостойкого листового проката в условиях АО «Уральская сталь»

В условиях стана 2800 разработана технология производства проката из водородостойкой стали. Выплавлена опытная плавка, произведен прокат методом термомеханической прокатки. Обеспечена максимально равномерная мелкозернистая микроструктура проката. На основании положительных результатов расширенных испытания на коррозионную-, трещино- стойкость и т.п. отгружена опытная партия листов в АО «ЗТЗ» для отработки технологии изготовления ТБД.



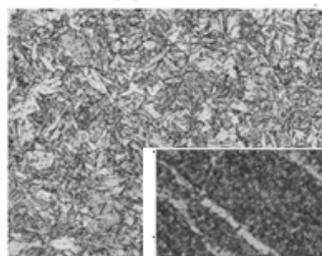
Микроструктура стали, x500



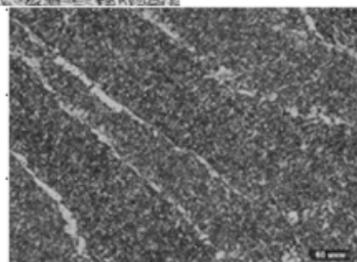
Производство труб осуществлялось в соответствии с разработанной технологией формовки, сварки технологического шва, сварки внутреннего и наружного шва, технологии экспандирования.

Химический состав труб, микроструктура

Состояние поставки: контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением
 Диаметр трубы: 1420 мм
 Стенка трубы: 14 мм



Микроструктура
ОМ: мелкозернистый бейнит
МШ: перлит с ферритной сеткой вокруг зерен
ЗТВ: смесь бейнита и игольчатого феррита



Исследованный металл

K52

Плавка № Z22223

Толщина 14 мм

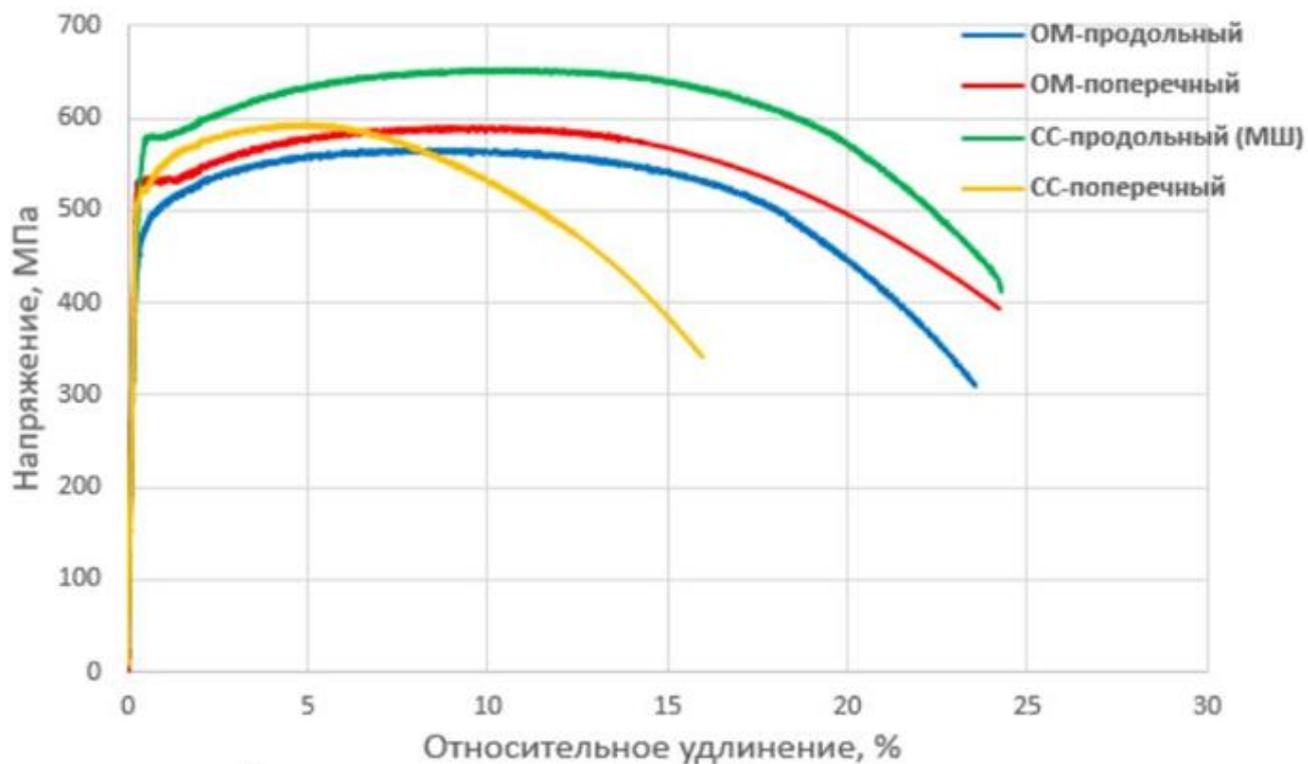
Маркировка № 853

Результаты химического анализа, масс. %

C	Mn	Cr	Si	Ni	Cu	Al
Результаты химического анализа						
0,065	1,30	0,06	0,17	0,07	0,13	0,047
0,068	1,25	0,06	0,31	0,26	0,11	0,040
Сертификат качества № 7945						
0,080	1,47	0,05	0,32	0,06	0,1	0,040
Mo	Co	Ti	V	P	S	Nb
Результаты химического анализа						
0,021	0,004	0,017	0,0006	0,011	0,0017	0,035
0,360	0,005	0,009	0,0024	0,014	0,0031	0,022
Сертификат качества № 7945						
0,008	-	0,017	0,0030	0,012	0,0020	0,030

Результаты механических испытаний

Исследованный металл	При температуре +20 °C				
	Rm, МПа	Rt0,5, МПа	Rt0,5/Rm	A, %	ψ, %
ОМ					
Продольное направление	566	493	0.87	23.7	77.4
ОМ					
Поперечное направление	594	527	0.89	24.1	77.1
СС (МШ)					
Продольное направление	646	581	0.90	24.1	71.2
СС					
Поперечное направление	594	543	0.91	15.5	76.7



На графике представлен средний из 3-х испытанных образцов

Выполнены статических автоклавных испытаний специальных образцов с нагрузкой болтом для определения уровня К_{ИИ} и оценки трещинообразования.

Условия выдержки: 30% Н₂ в МВС 9,8-10,0 МПа, 1000 часов, комнатная температура. *Уровень значений К_{ИИ} должен быть более 54,95 МПа√м.*

Наименьшее определенное значение К_{ИИ} – 56,05 МПа√м – **квалификация пройдена**

Место вырезки	Номер образца	К _{IApp} фактическое, МПа√м	Подрост трещины, мм	Уровень значений К _{ИИ} , МПа√м
ОМ	65	120.0	Менее 0,25	60.00
	66	121.3		60.65
	67	134.5		67.25
	71	112.1		56.05
МШ	72	125.5		62.75
	73	117.3		58.65
	77	112.8		56.40
ЗТВ	78	137.9		68.95
	79	121.5		60.75

Результаты испытаний

Программа испытаний методом SSRT

Объект	Место вырезки	Направление вырезки	15% H ₂ в МВС	30% H ₂ в МВС
К52 Плавка № Z22223 Темплет - 14 мм Маркировка: №853	Основной металл	Продольное	3 образца	3 образца
		Поперечное	3 образца	3 образца
	Сварное соединение	Продольное	3 образца	3 образца
		Поперечное	3 образца	3 образца

Оценка степени воздействия водорода на материал по условной формуле:

$$\text{Коэффициент [\%]} = \frac{\text{Испытание в среде водорода}}{\text{Контрольное испытание}} \times 100$$

Классификация материалов по степени склонности к возникновению ВО из литературных источников

Значение коэффициента изменения пластичности, %	Степень устойчивости
>90	высокая
80-90	хорошая
70-80	удовлетворительная
<70	неудовлетворительная

Результаты испытаний

Исследованный металл	$\beta_{R_{m}}$, %	$\beta_{R_{t0,5}}$, %	$E_p R$, %	Z_{rel} , %
ОМ Продольное 15% H ₂	100.8	97.6	99.2	101.5
ОМ Продольное 30% H ₂	100.0	99.1	98.9	96.9
ОМ Поперечное 15% H ₂	98.5	98.7	95.5	98.7
ОМ Поперечное 30% H ₂	98.9	101.1	94.8	97.4
СС (МШ) Продольное 15% H ₂	96.4	95.7	103.1	100.9
СС (МШ) Продольное 30% H ₂	98.5	98.6	108.0	100.7
СС Поперечное 15% H ₂	100.9	99.6	100.0	100.4
СС Поперечное 30% H ₂	100.4	101.4	100.5	100.6

Уменьшение пластичности ни в одном из случаев не превысило 10%

Заключение

Разработана и освоена технология производства водородостойкого проката. Удалось обеспечить максимально однородную мелкозернистую структуру в листовом прокате с получением заданного уровня механических свойств, необходимых для повышенного сопротивления водородному растрескиванию

Механические свойства основного металла и сварного соединения трубы произведенной на АО «ЗТЗ» из листового проката поставленного АО «Уральская сталь» удовлетворяют требуемому уровню значений для труб API 5L PSL 2 (уровень механических характеристик, рекомендованный ASME B31.12, для металла, контактирующего с водородсодержащей средой).

Согласно анализу результатов испытаний SSRT основной металл трубы и сварное соединение имеет высокую стойкость к ВО при растяжении непосредственно в МВС 15% и 30% под давлением до 10 МПа.

Наибольшая деградация механических характеристик выявлена по показателю относительного удлинения при испытании образцов, вырезанных из ОМ в поперечном направлении, в среде МВС 30% и не превышает 5,2%, что характеризуется «высокой стойкостью» к водородному охрупчиванию.

По результатам оценки трещиностойкости уровень значений КИН стали К52 в среде МВС 15% и 30% выше требуемого критериального значения $54,95 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ и составил: $56,0 \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}$ и $56,05 \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}$ соответственно.

Данный результат означает пригодность исследуемой стали для изготовления сосудов давления - труб для МВС с содержанием газообразного водорода в метане до 30%