

РОСНЕФТЬ

Разработка технологии односторонней сварки плакированных (биметаллических) труб с применением разнородных сварочных материалов

А.О. Худяков, Д.А. Абдульманов
ООО «РН-БашНИПИнефть»

VIII Научно-техническая конференция «КОРРОЗИЯ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»,
г. Самара, 2024

АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА РАБОТЫ

Актуальность

- Высокая коррозионная агрессивность перекачиваемых сред в нефте-газодобывающей отрасли диктует условия для поиска наиболее эффективных способов защиты трубопроводов от коррозии;
- Одним из перспективных способов защиты промысловых и технологических трубопроводов от коррозии является применение биметаллических труб;
- Применение биметаллов позволяет обеспечить комплекс механических и коррозионных свойств труб, которые трудно сочетаемы в отдельном монометалле;
- В настоящее время для сварки плакированных (биметаллических) труб используют дорогостоящие нержавеющие материалы. Качественная технология сварки комбинированными материалами (нержавеющие + низколегированные) отсутствует.

Новизна

- Впервые разработана технология ручной дуговой сварки биметаллических труб с применением разнородных сварочных материалов, снижающая затраты на сварочные материалы в 3-7 раз в зависимости от толщины свариваемых труб и обеспечивающая высокое качество сварных швов.

ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель

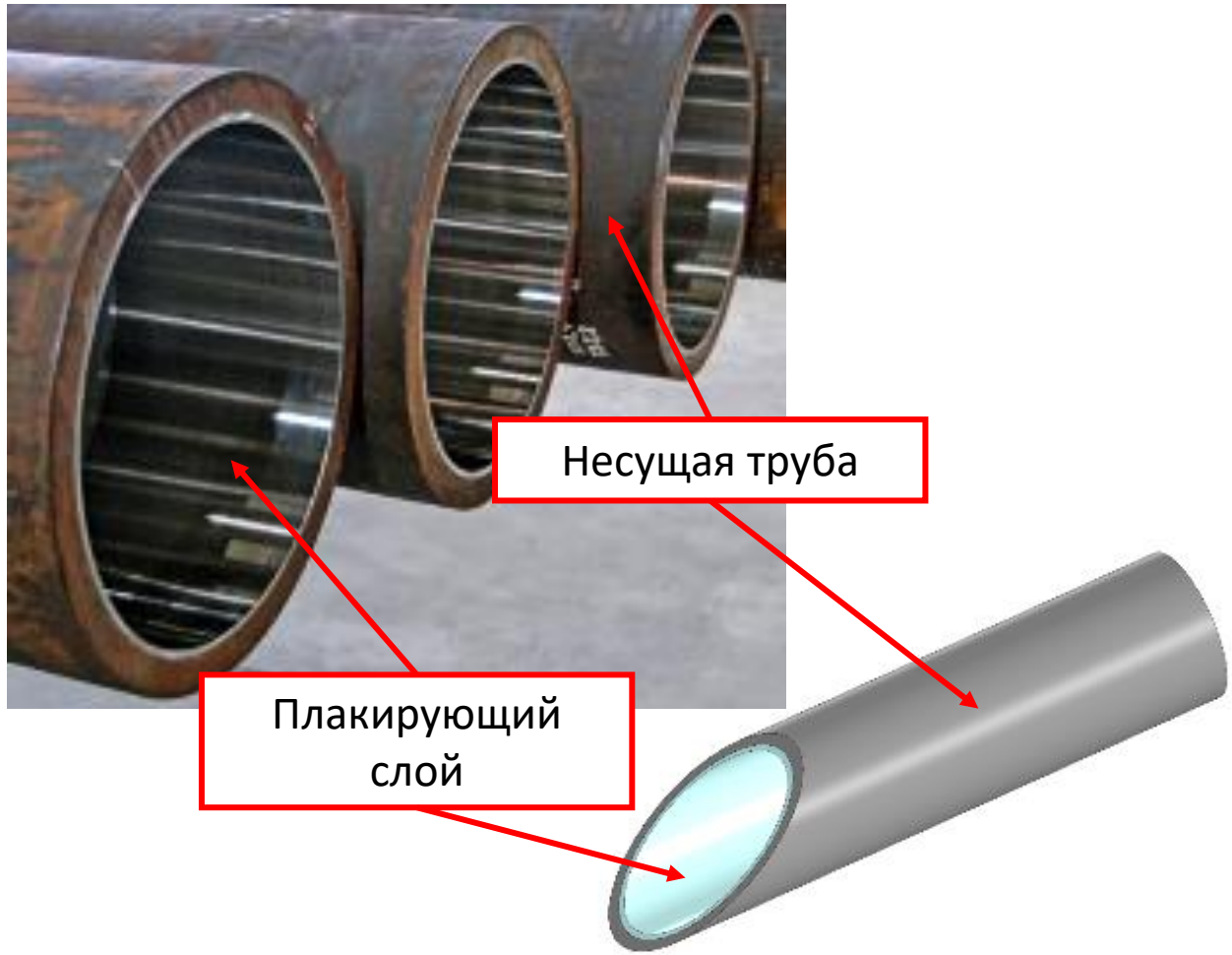
Разработка технологии односторонней ручной дуговой сварки биметаллических труб с помощью разнородных сварочных материалов.

Задачи

1. Изучить и проанализировать сварные соединения биметаллических труб, выполненные комбинированными и «нержавеющими» сварочными материалами;
2. Изучить формирование структуры и свойств переходного слоя при сварке разнородными материалами;
3. Произвести поиск технологических решений, позволяющих снизить твердость переходного слоя при односторонней сварке биметаллических конструкций.

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРУБЫ

Конструкция биметаллических труб

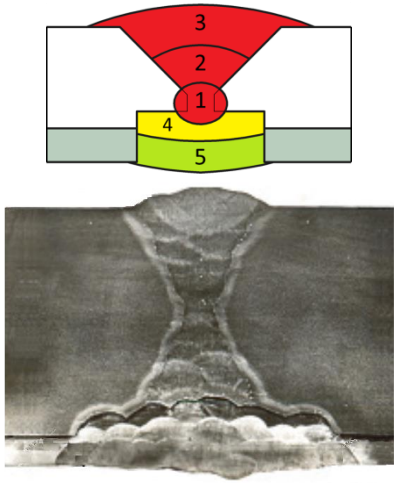


Качественная защита от коррозии может быть обеспечена за счет применения труб из двуслойных сталей.

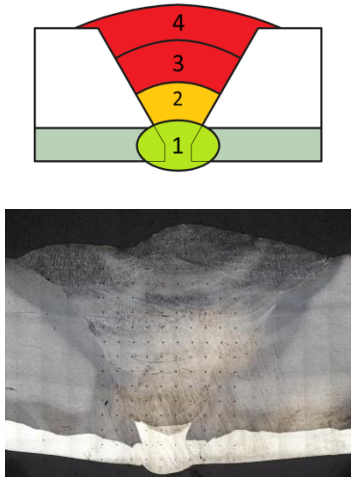
Двуслойные стали широко используются в химической, нефтегазодобывающей, атомной промышленности и других отраслях, где необходимо применение коррозионностойких к различным химическим средам материалов. Двухслойные стали состоят из основного слоя углеродистой или низколегированной стали для обеспечения необходимой механической прочности и материала более тонкого относительно общей толщины защитного высоколегированного коррозионностойкого плакирующего слоя. Таким способом достигается с одной стороны химическая стойкость материала, а с другой необходимая прочность за счет общей толщины.

ПРОБЛЕМАТИКА ОДНОСТОРОННЕЙ СВАРКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

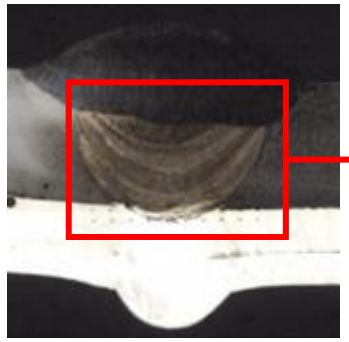
Сварка с двусторонним доступом



Сварка с односторонним доступом



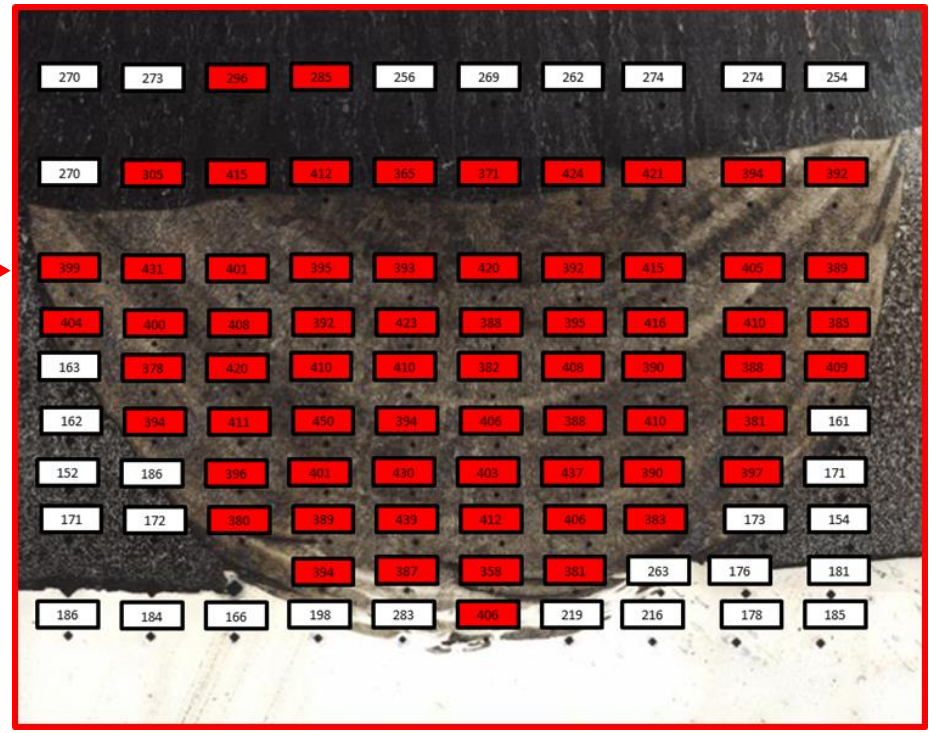
Пример сварного шва биметаллических труб



Требование ГОСТ 55990

HV≤280

Измерения твёрдости, HV1



1. При сварке труб диаметром менее 820 мм отсутствует доступ к сварному соединению изнутри, поэтому сварка выполняется односторонним доступом с наружной стороны;
2. При односторонней сварке биметаллических конструкций (труб) выполнение переходного слоя сопровождается расплавлением высоколегированного нержавеющего слоя и переходом легирующих элементов в металл сварочного валика. Это приводит к получению слоя шва с чрезвычайно высокими значениями твердости и низкими вязкопластическими характеристиками;
3. Для того, чтобы избежать повышения твердости в переходном слое, сварку биметаллических труб с односторонним доступом выполняют нержавеющими сварочными материалами.

СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩИМИ СВАРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Режимы сварки

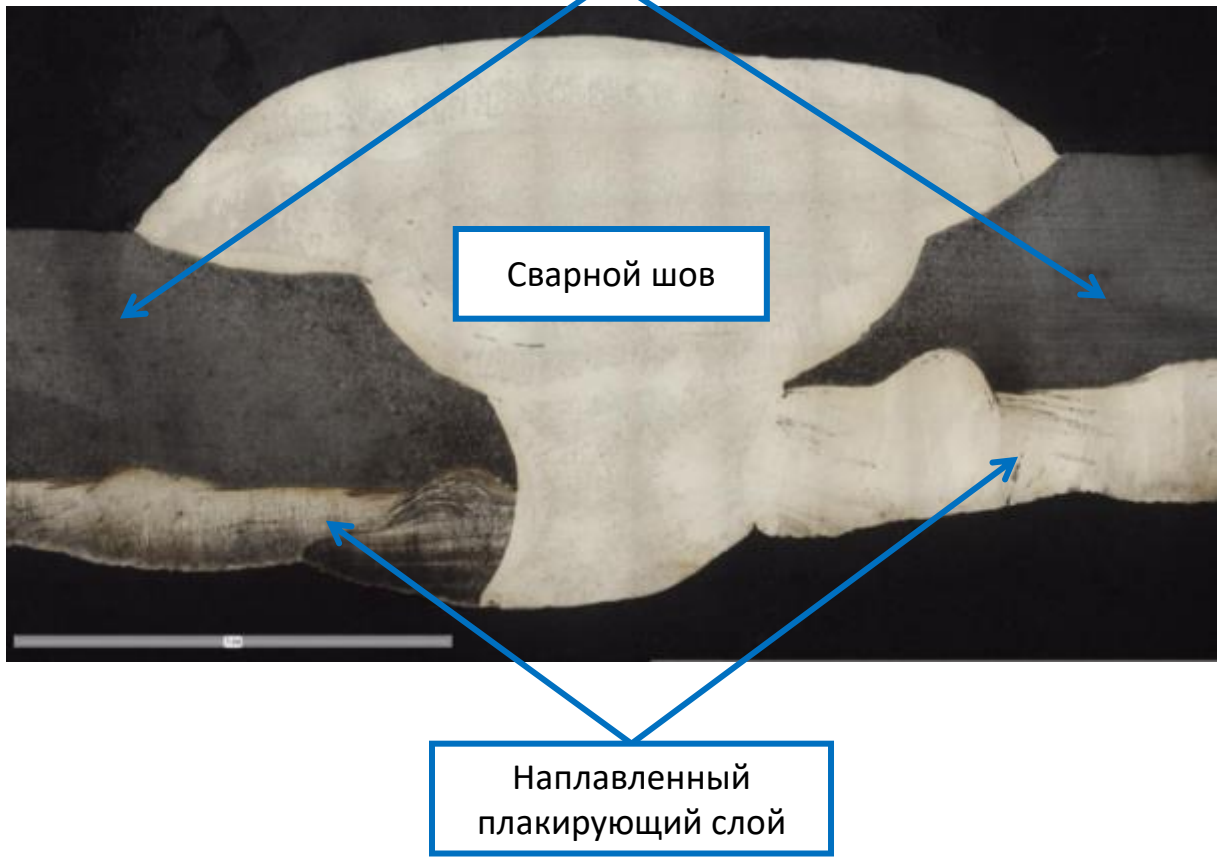
Труба Ø159х6 мм,
класс прочности К48

Корень шва:
Электроды марки **Esab OK 67.75**;
Dэ=**2,6 мм**;
Iсв= **50-55 А**.

Заполнение:
Электроды марки **Esab OK 67.75**;
Dэ= **3,2 мм**;
Iсв= **90-100 А**.

Облицовка:
Электроды марки **Esab OK 67.75**;
Dэ=**3,2 мм**;
Iсв=**100-110 А**.

Сварное соединение

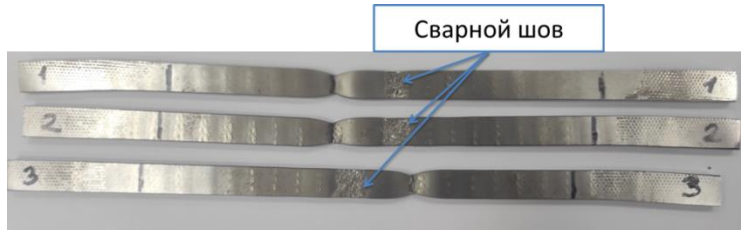


СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩИМИ СВАРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Механические испытания сварных соединений

Испытания на растяжение

№ Образца	Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Область разрушения
1	568	463	Основной металл
2	576	480	Основной металл
3	563	471	Основной металл
Среднее	**569**	**471**	

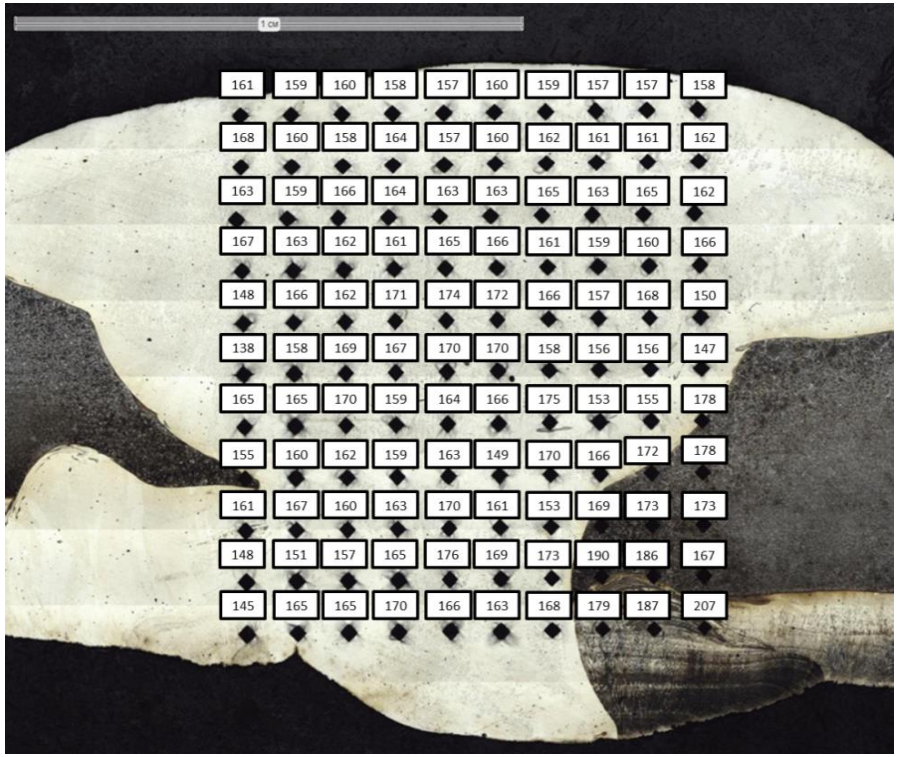


Испытания на статический изгиб

Примечание	Угол изгиба	Результат испытаний
Корень шва наружу	120°	Отсутствие трещин
Усиление шва наружу	120°	Отсутствие трещин
Боковой изгиб	120°	Наличие трещин



Измерение твердости по Виккерсу



Испытания на ударный изгиб

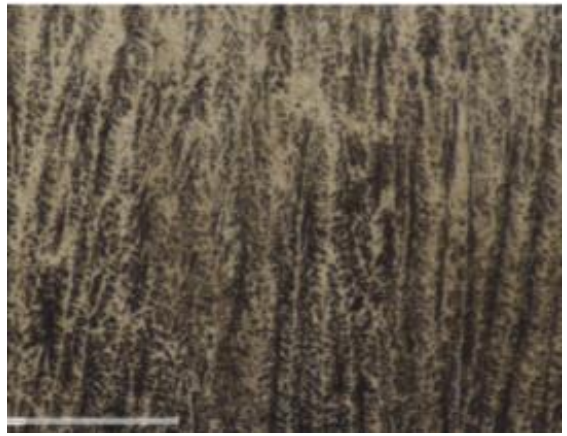
Расположение надреза	№ образца	Температура испытаний	Ударная вязкость KCV, Дж/см^2	
			по образцу	среднее
Центр шва	1	-20С	170	147
	2		121	
	3		149	
Линия сплавления	1	-20С	84	76
	2		60	
	3		84	

1. Сварное соединение равнопрочно основному металлу;
2. Трещина при испытании на боковой изгиб;
3. Ударная вязкость высокая, соответствует требованиям;
4. Снижение ударной вязкости по линии сплавления в 2 раза;
5. Твердость 138-190 HV, соответствует требованиям.

СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩИМИ СВАРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Металлографические исследования сварных соединений

Структура металла шва

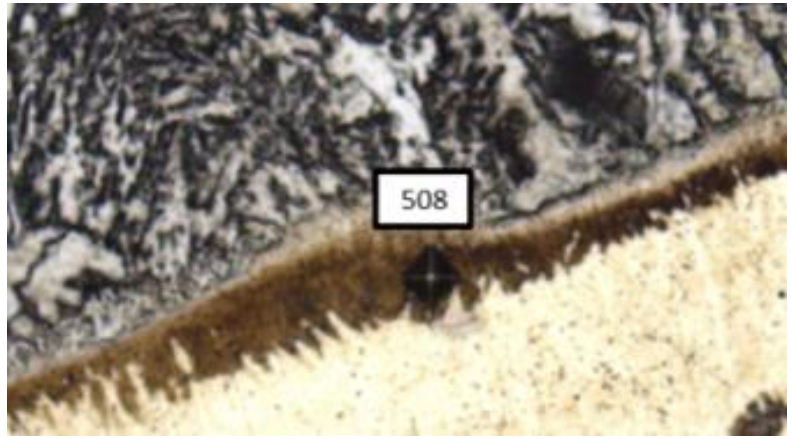


Структура металла в ЗТВ



Структура металла на линии сплавления



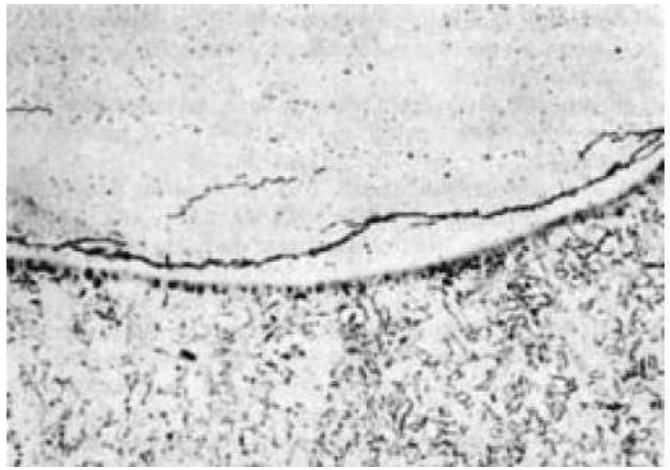


1. Сварной шов имеет структуру аустенита;
2. В зоне термического влияния формируется типичная для низколегированной стали феррит-перлитная структура;
3. На линии сплавления в металле сварного шва вследствие диффузии углерода образуется твердая и хрупкая прослойка карбидо-мартенситной гряды;
4. Твердость карбидо-мартенситной гряды достигает более 500 HV;
5. Формирование карбидо-мартенситной гряды обуславливает сильное снижение ударной вязкости на линии сплавления;
6. Сварное соединение обладает ярко выраженной неоднородностью.

РАЗРУШЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1. Область с повышенным содержанием карбидов в металле сварного шва обладает повышенной твердостью и хрупкостью и может приводить к зарождению трещин под действием остаточных сварочных напряжений;
2. Формирование карбидно-мартенситной гряды на линии сплавления может приводит к хрупкому разрушению сварного соединения.

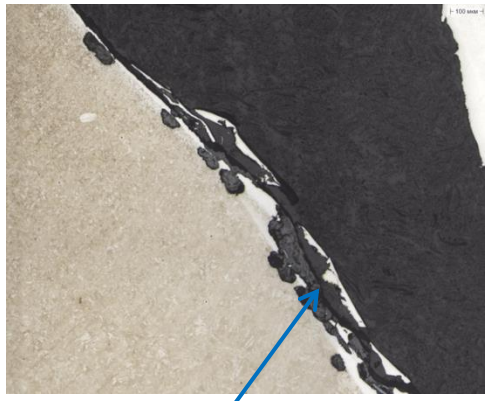
Зарождение и развитие трещин в сварном шве под действием остаточных сварочных напряжений

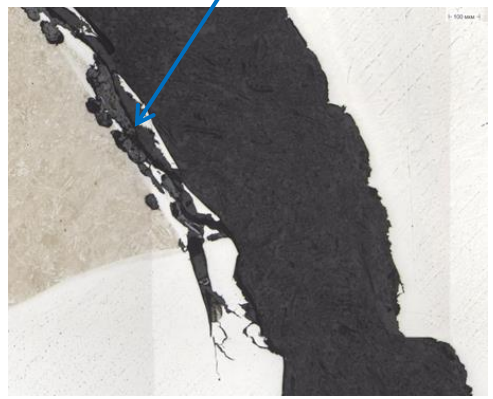


Хрупкое разрушение разнородного сварного соединения



Микрошлифы





ПОДЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнение всего сварного шва с применением высоколегированных («нержавеющих») сварочных материалов не гарантирует стойкости к хрупкому разрушению сварного соединения биметаллических труб и несет собой повышенные затраты на сварочные материалы. Поэтому актуальность поиска технологических решений для возможности применения комбинированных сварочных материалов не вызывает сомнений

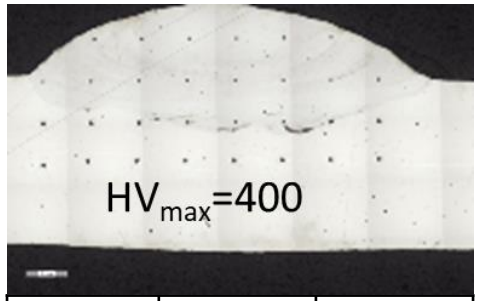
Подзадачи



1. Проанализировать влияние сварочных материалов и параметров режима сварки на твердость переходного слоя;
2. Произвести поиск технологических решений для снижения проплавляющей способности дуги;
3. Выполнить анализ влияния доли переплавленного «нержавеющего» металла на твердость переходного слоя;

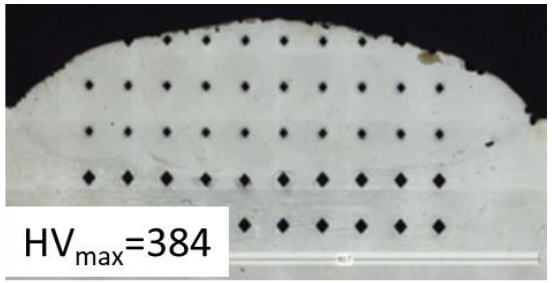
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НАПЛАВКЕ ВАЛИКОВ НА ПЛАСТИНУ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

УОНИ 13/55 Dэ=2,5 мм
$I_{св}$=60 А



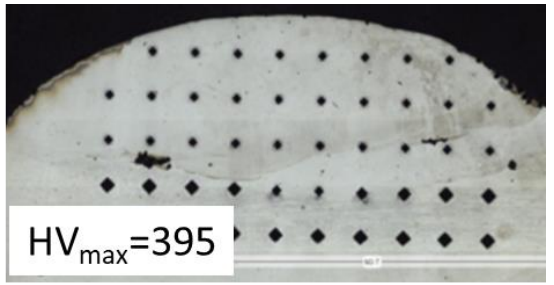
Mn	Cr	Ni
1,24	7,04	4,14

УОНИ 13/55 Dэ=2,5 мм
$I_{св}$=120 А



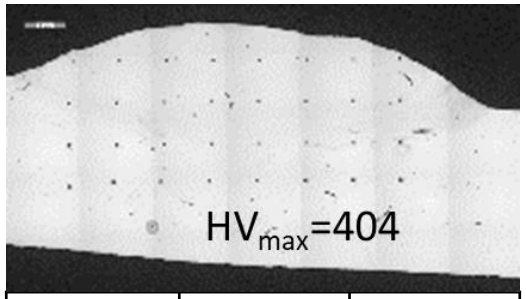
Mn	Cr	Ni
1,36	8,17	4,36

УОНИ 13/55 Dэ=2,5 мм
$I_{св}$=150 А



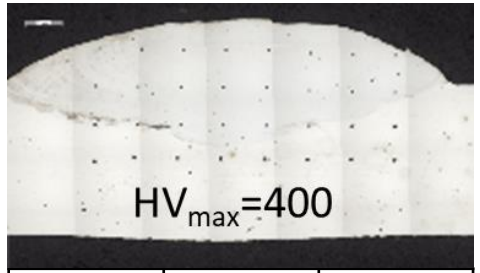
Mn	Cr	Ni
1,41	8,48	4,71

УОНИ 13/55 Dэ=2 мм
$I_{св}$=80 А



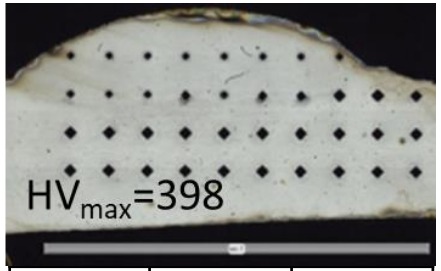
Mn	Cr	Ni
1,5	8,87	4,57

УОНИ 13/45 Dэ=2 мм
$I_{св}$=60 А



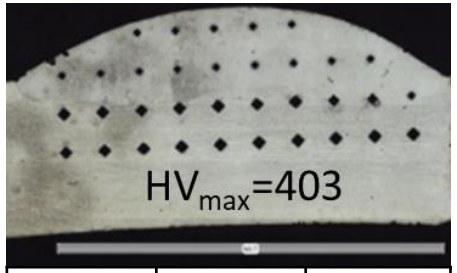
Mn	Cr	Ni
1,08	9,11	4,65

УОНИ 13/45 Dэ=2 мм
$I_{св}$=80 А



Mn	Cr	Ni
1,12	9,17	4,53

УОНИ 13/45 Dэ=2 мм
$I_{св}$=120 А

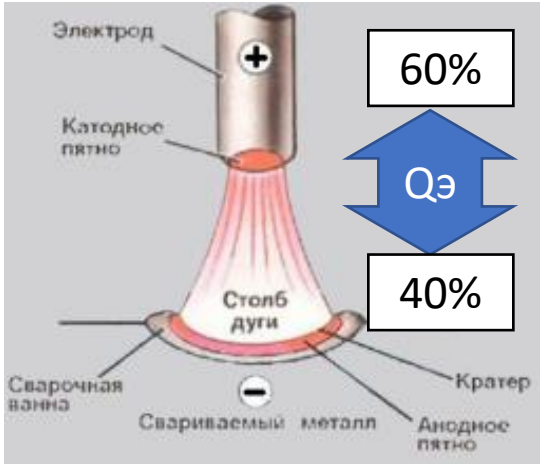


Mn	Cr	Ni
1,15	8,93	4,72

1. Изменение силы сварочного тока и диаметра электрода не приводят к снижению твердости наплавленного валика;
2. Применение электродов меньшей прочности также не привело к снижению твердости наплавленного валика.

ПРИЧИНА ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛА ПЕРЕХОДНОГО ВАЛИКА

Распределение эффективной энергии дуги



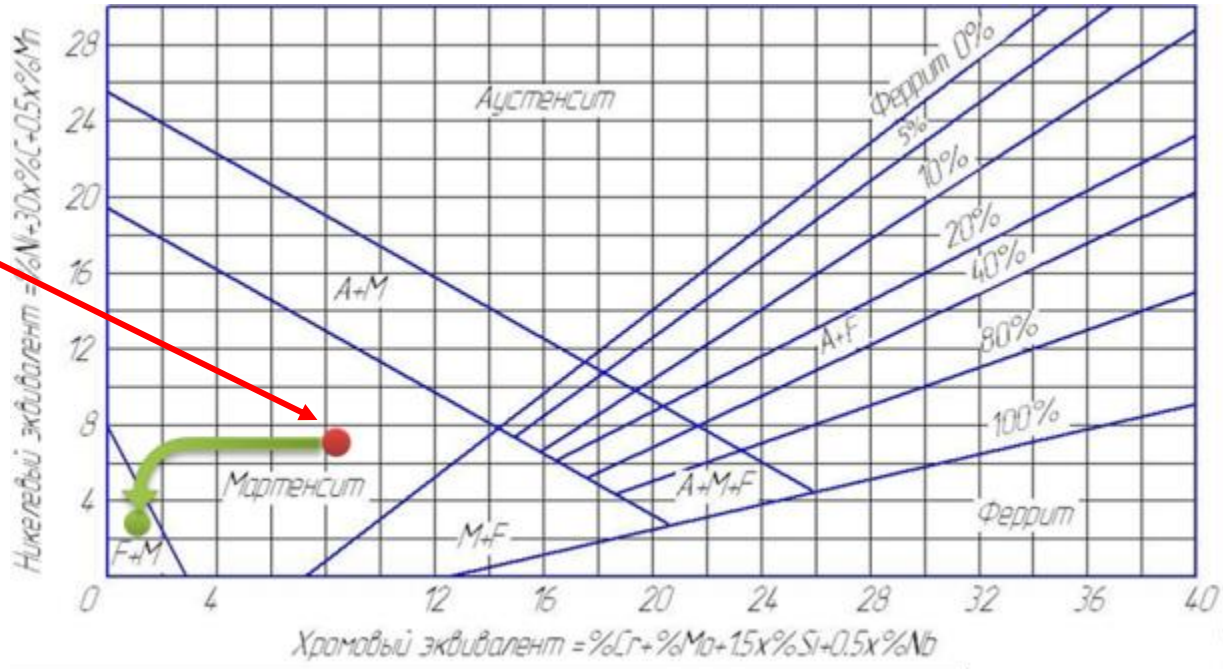
Сварной шов биметаллических труб



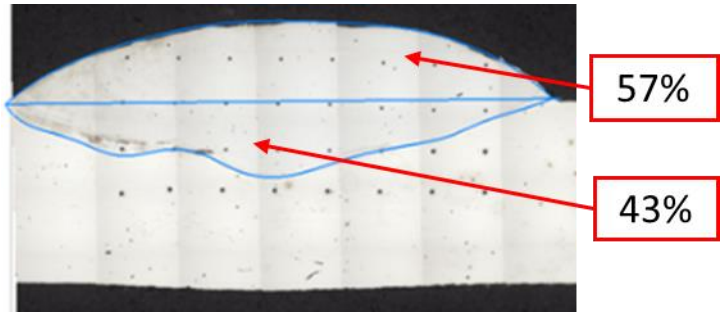
Химический состав переходного слоя

C	Mn	Si	Ni	Cr
0,094	1,03	0,38	3,52	7,48

Диаграмма Шеффлера



Наплавленный валик УОНИ 13/55 Dэ=2,5 мм Iсв=80А

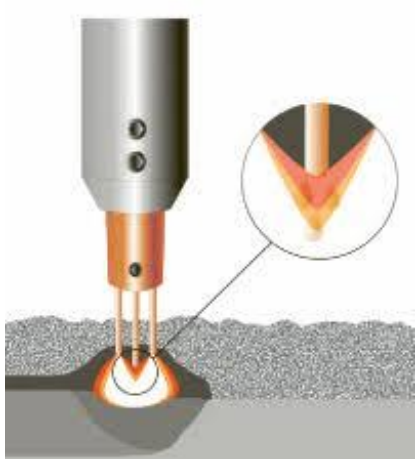


1. Из-за высокого содержания хрома и никеля согласно диаграмме Шеффлера в металле переходного слоя формируется структура мартенсита, что приводит к крайне высокой твердости;
2. Для снижения твердости в переходном слое необходимо снижать содержание хрома и никеля, т.е. долю расплавленного «нержавеющего материала».

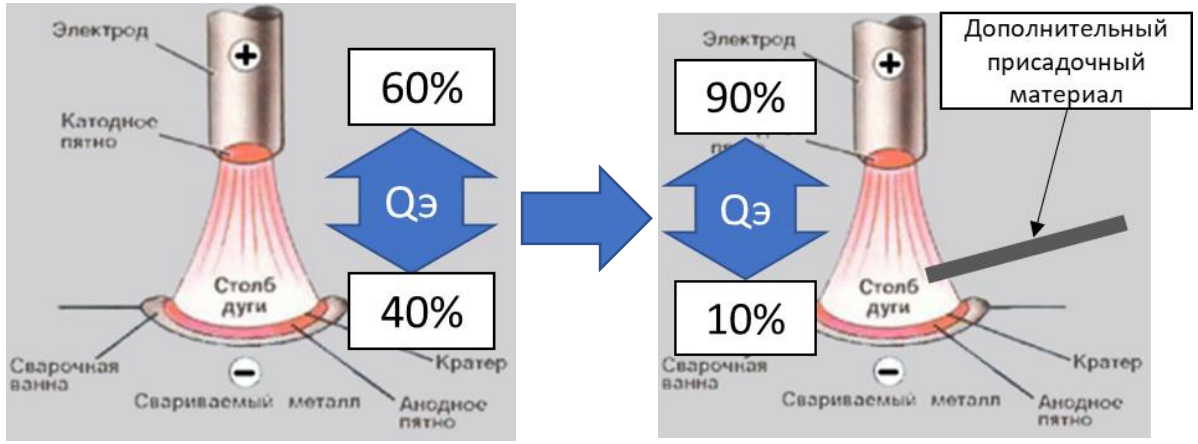
РЕШЕНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ПРИ СВАРКЕ КОМБИНИРОВАННЫМИ СВАРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

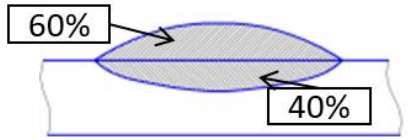
1. Для снижения твердости валика переходного слоя необходимо перераспределить энергию сварочной дуги и снизить ее проплавляющую способность;
2. Для снижения проплавляющей способности в зону сварочной дуги необходимо вводить дополнительный присадочный материал;
3. Прототипом для идеи послужила сварочная головка для автоматической сварки под флюсом Esab «Ice».

Сварочная головка Esab «Ice»

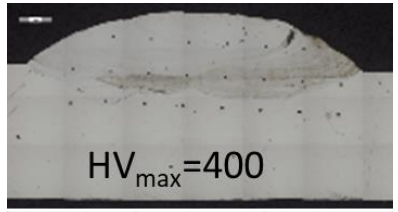


Перераспределение энергии в сварочной дуге

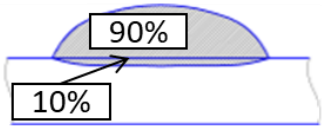




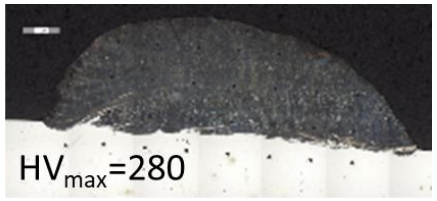
УОНИ 13/45 Dэ=2 мм
$I_{св}$=60 А



Mn	Cr	Ni
0,76	6,56	3,73



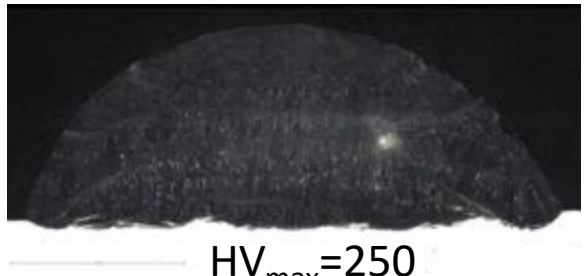
УОНИ 13/45 Dэ=2 мм +СВ-08Г2С
$I_{св}$=60 А



Mn	Cr	Ni
1,10	1,98	1,21

ЗАВИСИМОСТЬ ТВЕРДОСТИ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ОТ ДОЛИ РАСПЛАВЛЕННОГО «НЕРЖАВЕЮЩЕГО» МЕТАЛЛА

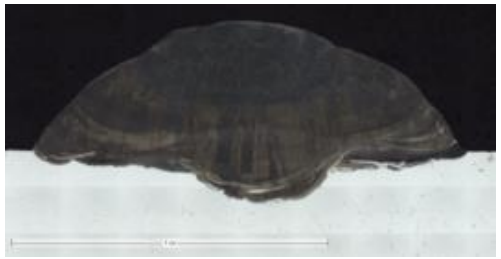
Макрошлифы наплавленных экспериментальных валиков



HV_{max}=250
Доля НЖ=8,8%



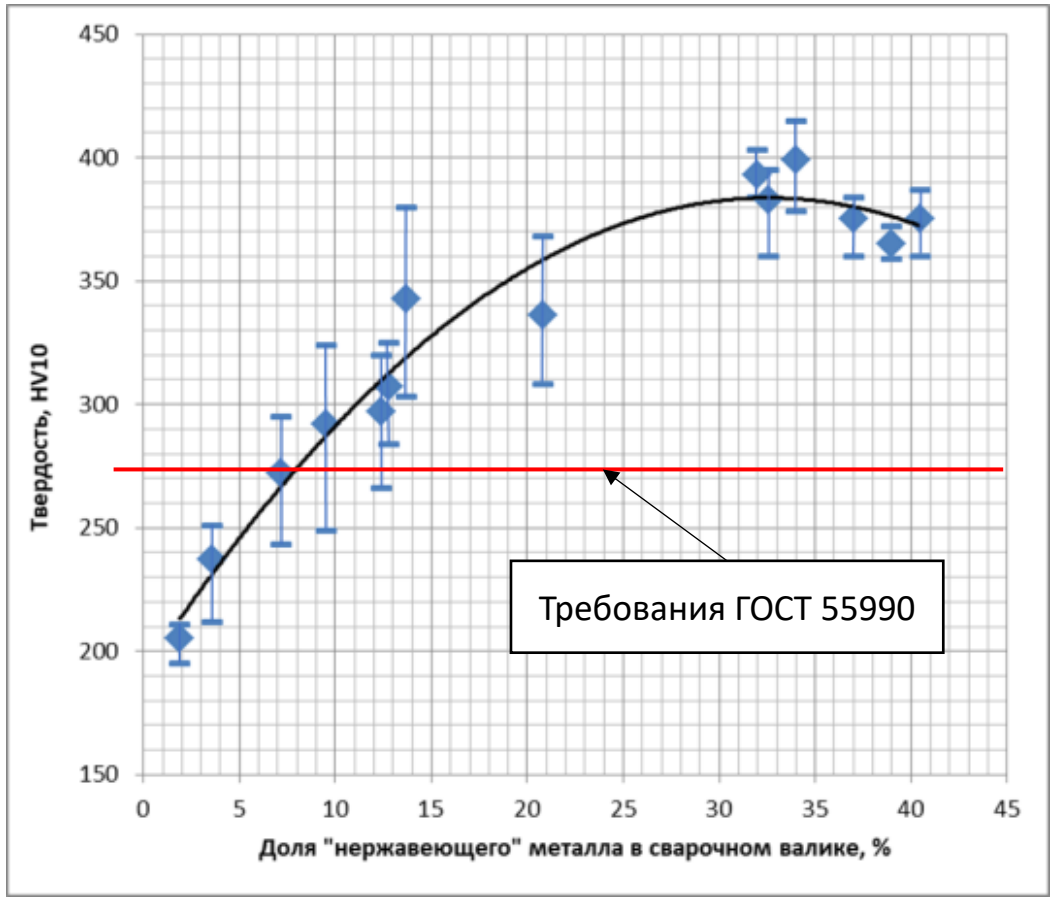
HV_{max}=325
Доля НЖ=12,4%



HV_{max}=368
Доля НЖ=20,8%

Для снижения твердости валика переходного слоя до нормируемых значений необходимо чтобы доля расплавленного металла составляла менее 10%.

Зависимость твердости переходного слоя от доли расплавленного «нержавеющего» металла



АПРОБАЦИЯ НАЙДЕННОГО РЕШЕНИЯ. ЭЛЕКТРОДЫ УОНИ 13/55

Режимы сварки

Труба 530х12 мм,
класс прочности К52

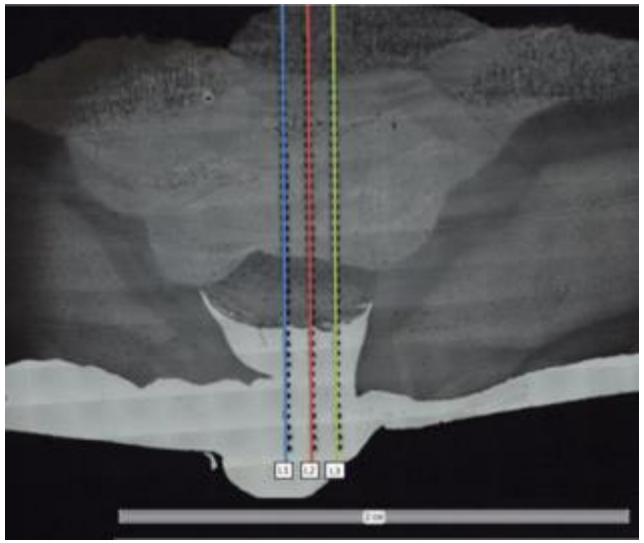
Корень шва:
Электроды марки **ЦЛ-11**;
Dэ=**2,5 мм**;
Iсв= **50-55 А**.

Переходный слой:
Электроды марки **УОНИ 13/55***;
Dэ= **2,5 мм**;
Iсв=**80-90 А**.

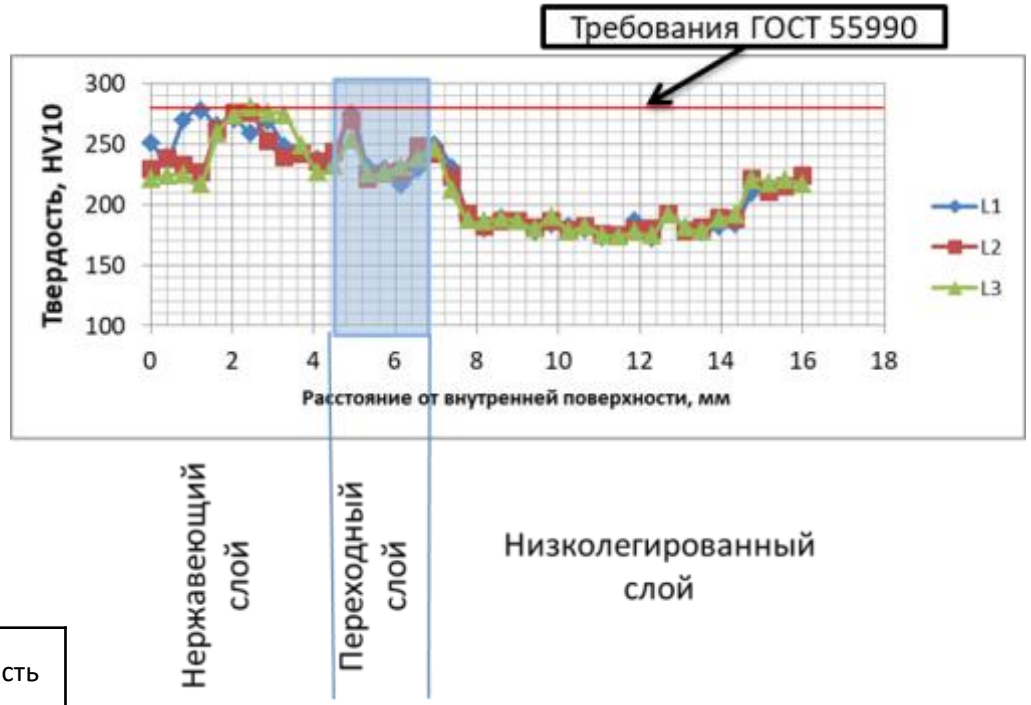
Заполнение и облицовка:
Электроды марки **АНО-11**;
Dэ=**3 мм**;
Iсв=**110-130 А**.

**с дополнительной присадкой*

Макрошлиф сварного соединения



Распределение твердости по сечению шва



Испытания на растяжение

№ Образца	Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Область разрушения
1	577	480	ОМ
2	586	470	ОМ
Среднее	**582**	**475**	



Испытания на ударный изгиб

Расположение надреза	t° исп, °С	Ударная вязкость KCV, Дж/см²	
		по образцу	среднее
Центр шва	-20°С	68	67
		62	
		67	
Линия сплавления	-20°С	83	84
		79	
		87	

Испытание на статический изгиб корнем наружу



АПРОБАЦИЯ НАЙДЕННОГО РЕШЕНИЯ. ЭЛЕКТРОДЫ LB-52U

Режимы сварки

Труба 530х12 мм,
класс прочности К52

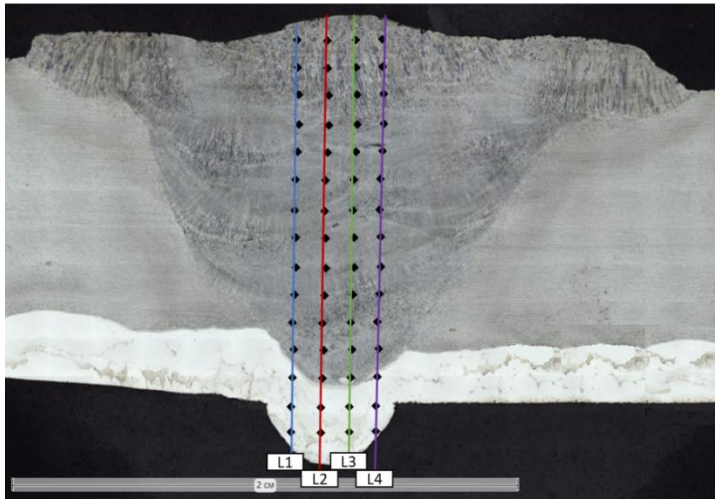
Корень шва:
Электроды марки **ОЗЛ-8**;
Dэ=**2,5 мм**;
Iсв= **50-55 А**.

Переходный слой:
Электроды марки **LB-52U***;
Dэ=**3,2 мм**
Iсв=**120-130 А**

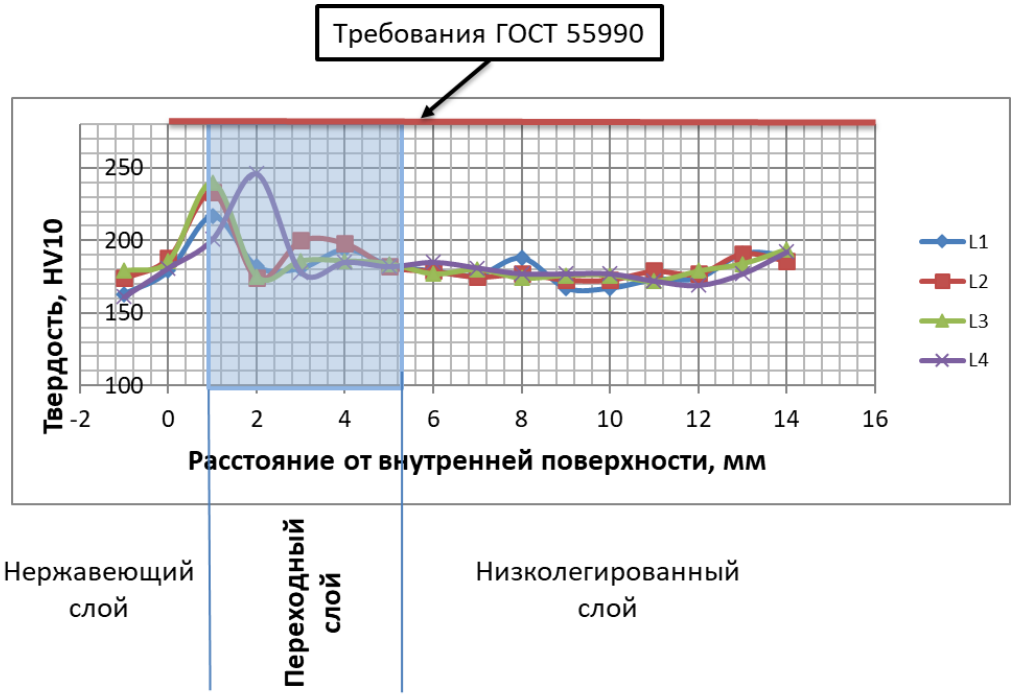
Заполнение и облицовка:
Электроды марки **LB-52U**;
Dэ=**3,2 мм**;
Iсв=**110-130 А**.

**с дополнительной присадкой*

Макрошлиф сварного соединения



Распределение твердости по сечению шва



Испытания на ударный изгиб

Расположение надреза	t° испт, °С	Ударная вязкость KCV, Дж/см²	
		по образцу	среднее
Центр шва	-20°С	123	124
		115	
		134	
Линия сплавления	-20°С	112	112
		108	
		117	

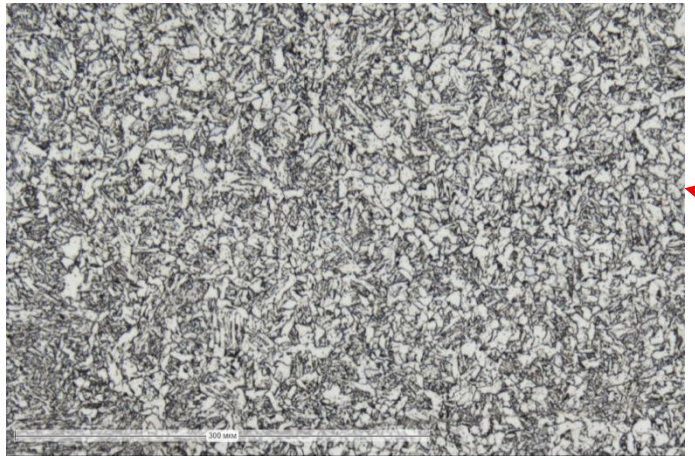
Испытания на растяжение

№ Образца	Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Область разрушения
1	555	469	ОМ
2	563	471	ОМ
Среднее	**559**	**470**	

1. Сварное соединение равнопрочно основному металлу;
2. Ударная вязкость высокая, соответствует требованиям;
3. Твердость переходного слоя не превышает 280 HV, соответствует требованиям.

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

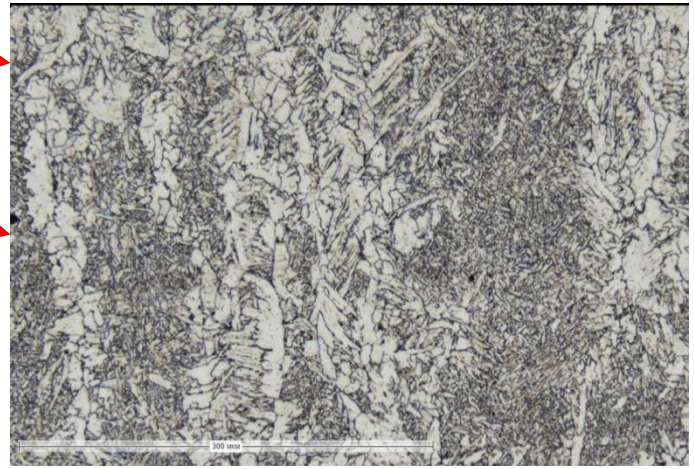
Феррит-бейнитная структура переходного слоя



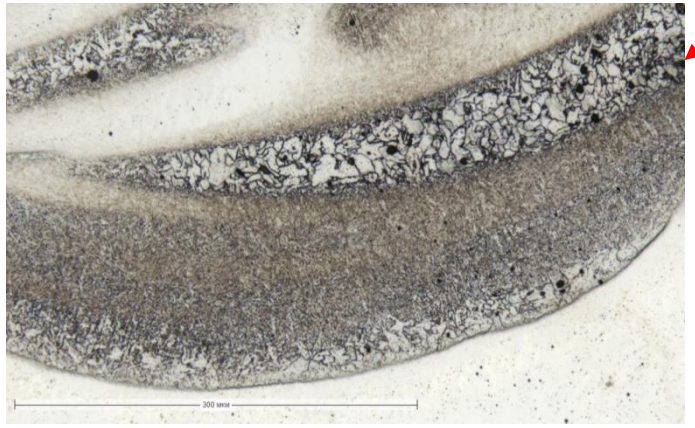
Макрошлиф



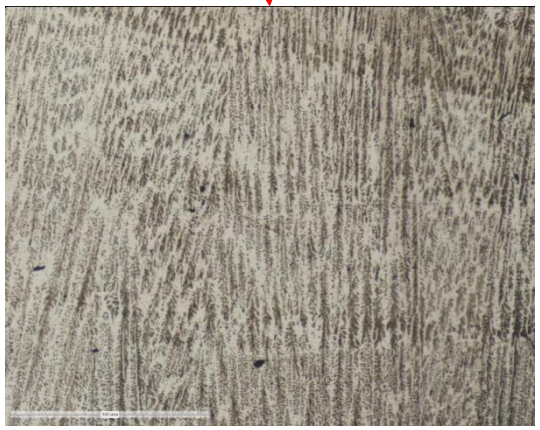
Дендритная структура заполняющих и облицовочных валиков



Линия сплавления переходного и корневого валиков



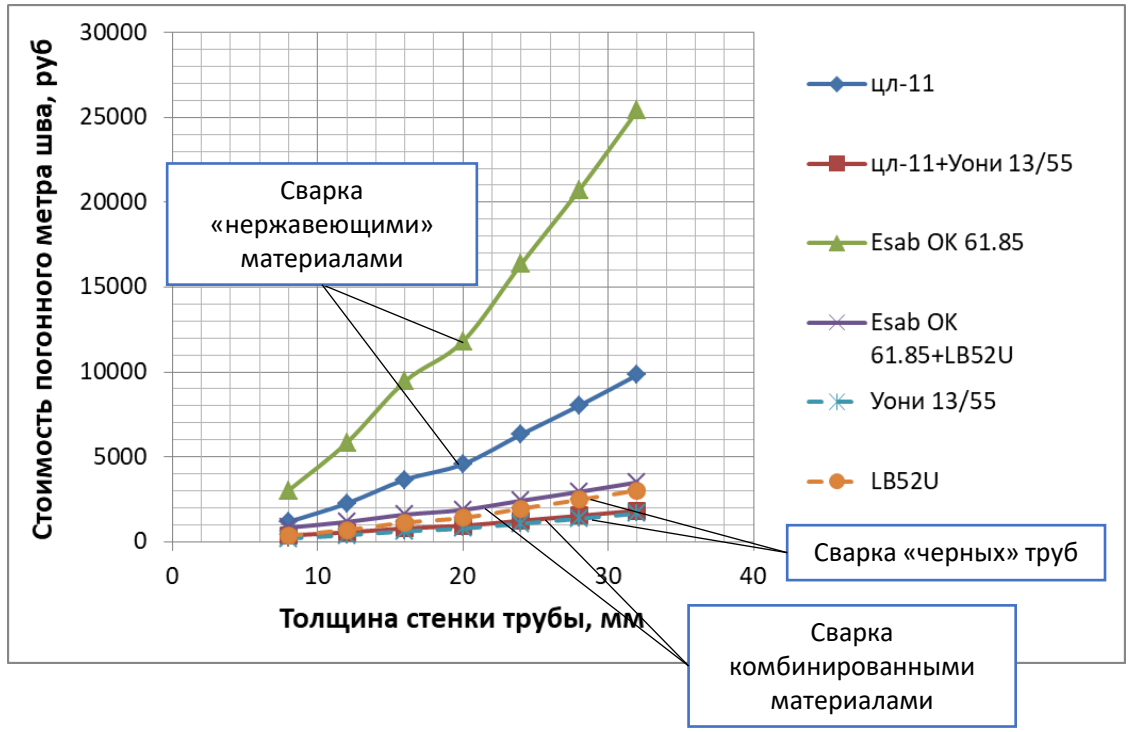
Аустенитная структура корневого валика



1. В корне шва формируется аустенитная структура с дендритным строением;
2. На линии сплавления между корневым и переходным валиками образуется отпущенный мартенсит, наблюдаются участки неполного перемешивания;
3. В переходном слое формируется феррит-бейнитная структура;
4. Дендритная структура в заполняющих и облицовочных валиках.

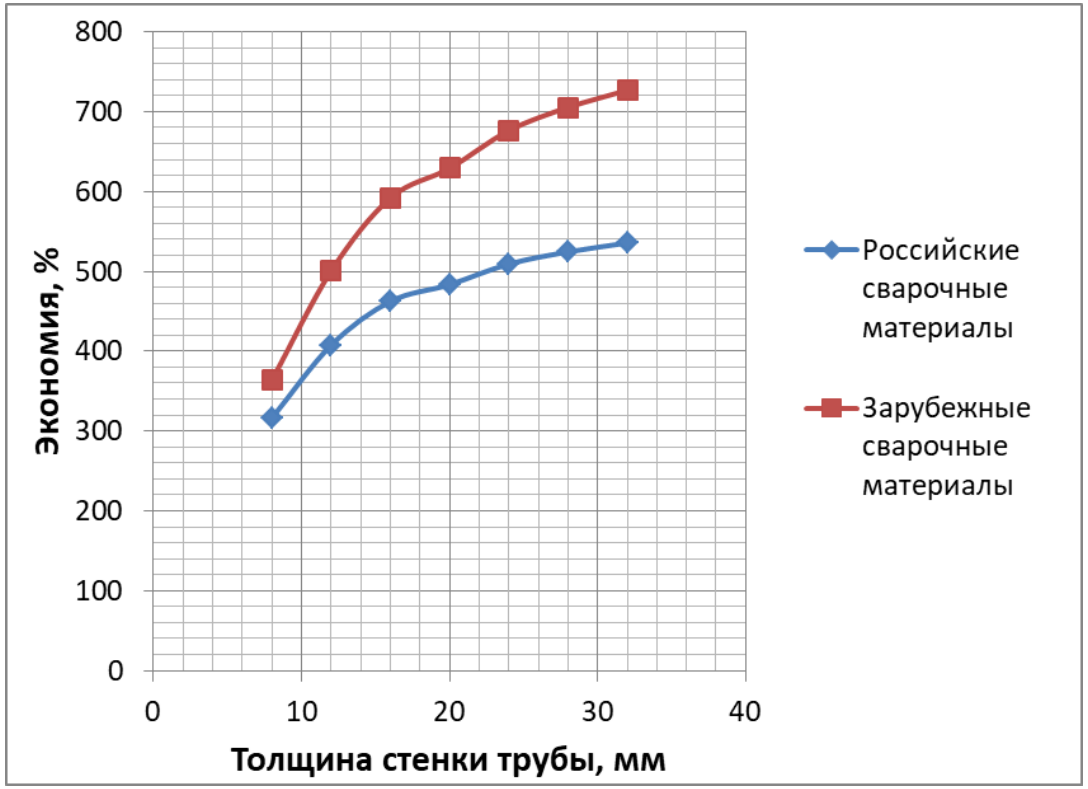
РАСЧЕТ СТОИМОСТИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Зависимость стоимости сварочных материалов от толщины стенки на 1 погонный метр шва



1. С увеличение толщины стенки свариваемых труб разница стоимости сварочных материалов существенно увеличивается;
2. Экономия денежных средств за счет применения комбинированных сварочных материалов составляет 300-500% для электродов российского производства, 350-700% - для электродов зарубежного производства

Экономия средств за счет применения комбинированных сварочных материалов



ЗАКЛЮЧЕНИЕ



- **Найден способ снижения твердости переходного слоя при односторонней сварке плакированных (биметаллических) конструкций с применением комбинированных сварочных материалов («нержавеющие»+низколегированные);**
- **Выполненные по экспериментальной технологии сварные соединения обладают удовлетворительной твердостью в переходном слое и высокими механическими характеристиками;**
- **Применение разрабатываемой технологии сварки биметаллических труб позволит снизить затраты на сварочные материалы в 3-7 раз в зависимости от толщины свариваемых труб.**



Предложения:

- Технология находится на начальном этапе разработки. Требуются дальнейшие исследования различных комбинаций металлов плакированных труб и комбинаций сварочных материалов.


РОСНЕФТЬ
СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



РОСНЕФТЬ

ООО «РН-БашНИПИнефть»

По всем возникающим вопросам просьба обращаться к
Худякову Артему Олеговичу

по адресу электронной почты: **Khudyakovao@bnipi.rosneft.ru**