

СВАРКА ДУПЛЕКСНЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

У дуплексной нержавеющей стали, имеющей двухфазную микроструктуру, состоящую из ферритных и аустенитных зерен, нет недостатков, присущих двум типам стали. Она отличается более высоким сопротивлением коррозионному растрескиванию под напряжением по сравнению с аустенитными нержавеющей стали и лучшей ударной вязкостью по сравнению с ферритными нержавеющей стали. Дуплексная нержавеющая сталь играет важную роль в таком широком спектре применений, как нефтехимические заводы, суда для перевозки химикатов, морские сооружения и мосты (рис. 1).

В данной статье рассмотрены свойства дуплексных нержавеющей сталей, а также наиболее подходящие для них сварочные материалы.

Свойства дуплексных нержавеющей сталей.

Микроструктура дуплексной нержавеющей стали показывает, что аустенитные зерна перешли в полностью ферритную фазу с балансом фазы примерно в 50 % феррита и 50 % аустенита. Такое состояние микроструктуры является наиболее устойчивым, поэтому можно отметить следующие свойства дуплексной нержавеющей стали.

По сравнению с аустенитной нержавеющей сталью дуплексная нержавеющая сталь имеет следующие преимущества:

- меньший коэффициент термического расширения и более высокая теплопроводность, большая прочность при комнатной температуре;
- отличная сопротивляемость растрескиванию от язвенной коррозии и коррозии под напряжением.

При этом для них характерны следующие особенности:

- более высокое содержание азота;
- большая микроструктурная трансформация при тепловой обработке и большая склонность к ухудшению свойств, в том числе сопротивлению коррозии.

Последствия микроструктурной трансформации особенно заметны в околошовной зоне.

Дуплексные нержавеющей стали производятся в основном в виде трех марок, которые отличаются по химическому составу: стандартная, супердуплексная и низколегированная.

1. Стандартная дуплексная нержавеющая сталь: состав 22 % Cr–5 % Ni–3 % Mo–0,15 % N.

2. Супердуплексная нержавеющая сталь: содержание молибдена и азота выше по сравнению со стандартной сталью, что дает более высокую прочность при комнатной температуре и сопротивляемость язвенной коррозии.

3. Низколегированная дуплексная нержавеющая сталь: содержание никеля и молибдена ниже по сравнению со стандартной сталью, что позволяет снизить ее стоимость.

В табл. 1 показаны типичные химические формулы трех марок дуплексных нержавеющей сталей. На рис. 2 приводится относительное сравнение разрывной прочности и индекса сопротивления язвенной коррозии PREW разных нержавеющей сталей. Более высокий показатель PREW означает лучшее сопротивление язвенной коррозии.

Свойства околошовной зоны дуплексной нержавеющей стали. В дуплексной нержавеющей стали двойные фазы аустенитных и ферритных зерен сбалансированы в процессе тепловой обработки. Однако в околошовной зоне дуплексной нержавеющей стали сопротивление язвенной коррозии и механические свойства могут иногда ухудшаться из-за того, что фазовый баланс и химические формулы двойных фаз меняются в соответствии со скоростью охлаждения, на которую влияет погонная энергия сварки и толщина свариваемых пластин.



Рис. 1. Главная башенная опора моста Стоункаттерс, поднимающаяся более чем на 175 м над уровнем моря (Гонконг)

*Дистрибьютором сварочных материалов марки KOBELCO в Украине является компания ООО «НИСА».

Таблица 1. Типичный химический состав дуплексных нержавеющей сталей, мас. %

Марка	UNS No	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	W	N	PREW*
Стандартная	S31803	0,02	0,5	1,5	0,02	0,001	0,4	22,1	6,0	3,0	–	0,12	33,9
	S32205	0,02	0,4	1,4	0,03	0,001	0,3	22,1	5,6	3,1	–	0,18	35,2
Супер	S32750	0,02	0,4	0,7	0,02	0,001	0,1	25,6	7,0	3,8	0,1	0,28	42,8
	S32760	0,03	0,3	0,7	0,02	0,001	0,6	25,4	7,0	3,5	0,6	0,21	41,3
Низколегированная	S32101	0,03	0,7	4,9	0,03	0,001	0,2	21,6	1,5	0,2	–	0,22	25,8
	S32304	0,02	0,5	1,5	0,02	0,001	0,2	22,7	4,7	0,3	–	0,10	25,3

*PREW = Cr + 3,3(Mo + 0.5W) + 16N

Говоря более точно, в высокотемпературной околосшовной зоне, близкой к поверхности раздела сварного шва, аустенитные зерна сначала растворяются в ферритную фазу, а затем выделяются как аустенитные зерна в процессе охлаждения, и в конце концов создают двойные микроструктуры. Однако если из-за слишком низкой погонной энергии скорость охлаждения высока, повторное выделение аустенитных зерен задерживается, и в ферритных зернах выделяются карбиды хрома и/или нитриды хрома. В результате в районе околосшовной зоны формируется слой с низким содержанием хрома, что приводит к снижению сопротивляемости коррозии.

С другой стороны, в низкотемпературной околосшовной зоне, удаленной от поверхности раздела внутри сварного шва, низкая скорость охлаждения, вызванная высокой погонной энергией, может привести к росту ферритных зерен и выделению σ-фазы, карбидов хрома и нитридов хрома, что снижает сопротивляемость коррозии и ударную вязкость.

Таким образом, высокотемпературная околосшовная зона требует относительно медленного охлаждения, чтобы сделать возможным достаточное формирование аустенитных зерен, тогда как низкотемпературная околосшовная зона требует гораздо более быстрого охлаждения, чтобы сдержать ненужное неблагоприятное структурообра-

зование. Поэтому как в высокотемпературной, так и в низкотемпературной околосшовных зонах необходимо контролировать скорость остывания посредством соответствующей погонной энергии, предварительного нагрева и температуры между проходами.

Металл шва для соединений дуплексной нержавеющей стали. Металл шва дуплексной нержавеющей стали корректируется таким образом, чтобы придать ему требуемые свойства в состоянии после сварки (рис. 3). В отличие от равномерного распределения ферритной и аустенитной фаз в дуплексной нержавеющей стали, в металле шва они распределяются гораздо более беспорядочно.

На рис. 4, 5 соответственно показано соотношение между ферритным числом (FN), т. е. содержанием ферритной фазы и разрывной прочностью/условным пределом текучести, и между ферритным числом/ударной вязкостью металла шва, полученного при сварке с порошковой проволокой (FCW) марки E2594 по AWS.

Как показывают приведенные цифры, по мере увеличения ферритного числа прочность при комнатной температуре повышается, тогда как ударная вязкость снижается. Поскольку ферритное число также влияет на сопротивление язвенной коррозии, хорошие механические свойства и сопротивляемость язвенной коррозии могут быть получены за счет выбора наиболее подходящих сварочных материалов и контроля сварочных процессов, в том числе скорости расплавления и/или охлаждения основного металла, с тем, чтобы ферритное число находилось в промежутке от 30 до

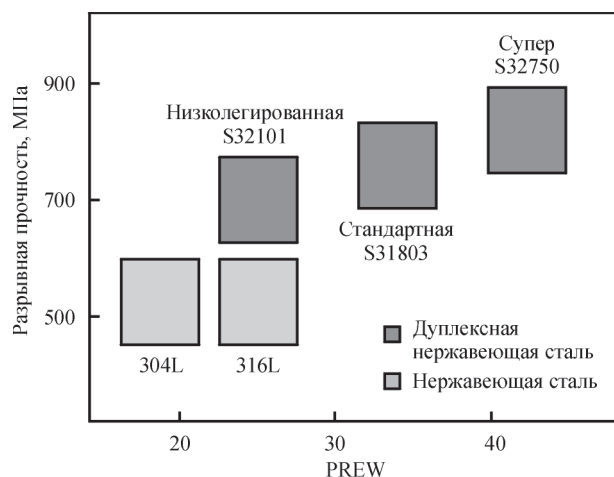


Рис. 2. Относительное сравнение разрывной прочности и индекса сопротивления язвенной коррозии (PREW) различных нержавеющих сталей

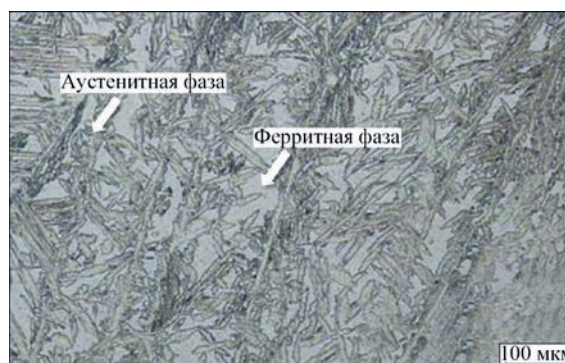


Рис. 3. Микроструктура металла шва дуплексной нержавеющей стали

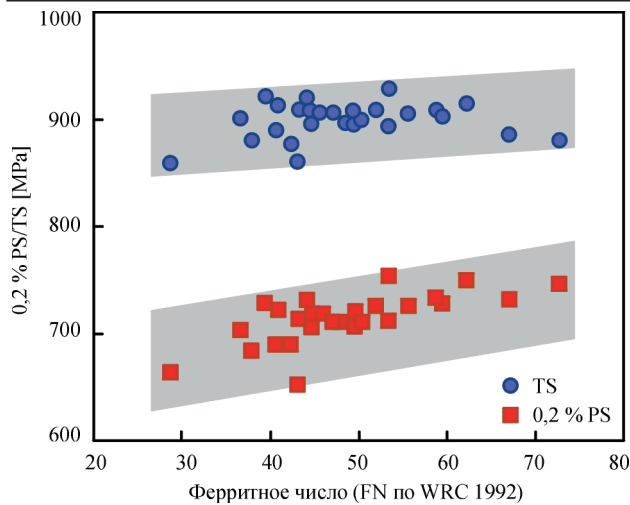


Рис. 4. Соотношение между ферритным числом и разрывной прочностью/условным пределом текучести при остаточной деформации 0,2 % металла шва, полученного при сварке с флюсовой проволокой (FCW) марки E2594

65. Кроме того, поскольку металл шва менее устойчив к коррозии по сравнению с основным металлом, в процессе производства которого применяется термическая обработка для улучшения качеств, металл шва содержит несколько большее количество легирующих элементов, чем основной металл. Содержание никеля в металле шва также предусматривается более высоким по сравнению с основным металлом, чтобы во многих случаях оптимизировать соотношение аустенитных и ферритных зерен в условиях после сварки.

Поскольку ферритное число в металле шва оказывает влияние на механические свойства, а также на сопротивляемость язвенной коррозии, очень важно проверять и контролировать его. Но каким образом измеряется ферритное число? Существуют три способа: подсчет точечным методом с использованием микроструктур, с помощью диаграммы WRC-1992 с химическими формулами, а также с помощью прибора Feritscope, который использует вихревой ток и магнитную индукцию. На местах проведения сварки подсчет точечным методом применяется редко ввиду его сложности. Когда при сварке стыковых соединений необходимо контролировать ферритное число, для определения годности/негодности предпочтение отдается прибору Feritscope.

На рис. 6 представлено соотношение ферритного числа, измеренного с помощью прибора Feritscope и определенного по диаграмме WRC. Видно, что данные не полностью совпадают. Поэтому необходимо принимать во внимание, каким методом определено ферритное число.

Сварочные материалы дуплексной нержавеющей стали компании Kobelco. Сварочные материалы дуплексной нержавеющей стали компании Kobelco предлагаются для всех марок дуплексной

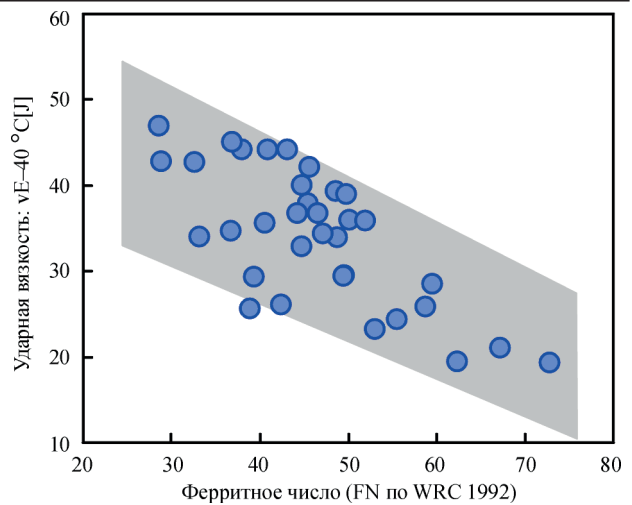


Рис. 5. Соотношение между ферритным числом и ударной вязкостью металла FCW марки E2594

нержавеющей стали. Они приведены в табл. 2 вместе с их химическими составами и механическими свойствами.

Ключевым фактором в производстве сварочных материалов для дуплексных нержавеющей сталей является контролирование относительно высокого содержания азота, которое часто вызывает проблемы, связанные с пористостью, в частности, образованием свищей, ямок и удлиненных пор, а также затрудненным удалением шлака. Это также может нарушить радиографичность при дуговой сварке с порошковым электродом (FCAW) и сварке защищенной дугой (SMAW) в горизонтальном и потолочном положении. Для избежания проблем, связанных с образованием пористости, сварочные материалы компании Kobelco создаются таким образом, чтобы повысить растворимость азота путем изменения химических формул металла шва, а также оптимизировать температуру отверждения и вязкость шлака. Улучшение

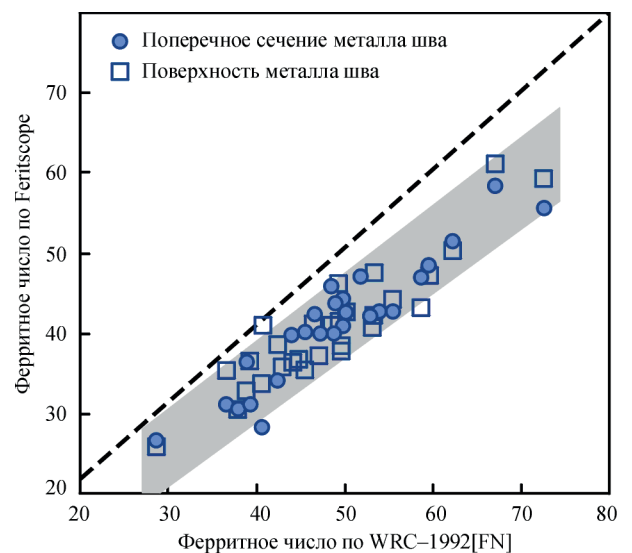


Рис. 6. Соотношение ферритного числа по Feritscope и диаграмме WRC

Таблица 2. Типичные свойства сварочных материалов дуплексной нержавеющей стали компании Kobelco

Марка	Сварочный процесс	Наименование товара	Классификация AWS	Химический состав, мас. %								
				C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	PREW*1	FNW*2 [FN]
Стандартная дуплексная нержавеющая сталь	GTAW	[P] TG-S2209	A5.9/A5.9M ER2209	0,008	0,39	1,67	8,7	22,7	3,10	0,16	35,5	51
	SMAW	[P] NC-2209	A5.4/A5.4M E2209-16	0,028	0,54	1,14	8,8	23,1	3,34	0,15	36,5	51
	FCAW	[P] DW-329AP	A5.22/A5.22M E2209T1-1/-4	0,023	0,57	0,66	9,4	23,0	3,40	0,14	36,4	49
	FCAW	[P] DW-2209	A5.22/A5.22M E2209T1-1/-4	0,028	0,61	0,74	9,1	22,7	3,30	0,13	35,6	46
	SAW	[P] US-2209/[P] PF-S1D	A5.9/A5.9M ER2209 (Wire)	0,021	0,31	1,56	8,9	23,0	3,28	0,15	35,9	57
Супердуплексная нержавеющая сталь	GTAW	[P] TG-S2594	A5.9/A5.9M ER2594	0,019	0,44	0,57	9,3	25,0	3,82	0,28	42,0	42
	SMAW	[P] NC-2594	A5.4/A5.4M E2594-16	0,035	0,55	0,66	9,8	26,6	3,86	0,25	43,3	50
	FCAW	[P] DW-2594	A5.22/A5.22M E2594T1-1/-4	0,026	0,50	1,18	9,6	25,7	3,79	0,24	42,0	49
Низколегированная дуплексная нержавеющая сталь	FCAW	[P] DW-2307	A5.22/A5.22M E2594T1-1/-4	0,026	0,45	1,26	7,9	24,6	0,03	0,15	27,1	41

Продолжение табл. 2

Марка	Сварочный процесс	Наименование товара	Классификация AWS	Механические свойства				Примечания
				0,2 % PS [MPa]	TS [MPa]	EI [%] (G.L.=4D)	vE0°C [J]	
Стандартная дуплексная нержавеющая сталь	GTAW	[P] TG-S2209	A5.9/A5.9M ER2209	598	773	39	270	DCEN, 100%Ar
	SMAW	[P] NC-2209	A5.4/A5.4M E2209-16	667	845	30	97	DCEP
	FCAW	[P] DW-329AP	A5.22/A5.22M E2209T1-1/-4	605	823	30	55	DCEP, 100%CO ₂
	FCAW	[P] DW-2209	A5.22/A5.22M E2209T1-1/-4	639	820	28	73	DCEP, 80%Ar+20%CO ₂
	SAW	[P] US-2209/[P] PF-S1D	A5.9/A5.9M ER2209 (Wire)	618	798	29	69	DCEP
Супердуплексная нержавеющая сталь	GTAW	[P] TG-S2594	A5.9/A5.9M ER2594	721	870	31	286	DCEN, 98%Ar+2%N ₂
	SMAW	[P] NC-2594	A5.4/A5.4M E2594-16	750	935	28	55	DCEP
	FCAW	[P] DW-2594	A5.22/A5.22M E2594T1-1/-4	712	905	27	55	DCEP, 80%Ar+20%CO ₂
Низколегированная дуплексная нержавеющая сталь	FCAW	[P] DW-2307	A5.22/A5.22M E2594T1-1/-4	571	750	29	58	DCEP, 80%Ar+20%CO ₂

*1: PREW=Cr+3.3(Mo+0.5W)+16N.

*2: FNW=Ферритное число по диаграмме WRC-1992 [P] для PREMIARCTM.

удаляемости шлака необходимо, так как содержащийся в металле шва азот затрудняет его удаление, несмотря на то, что шлак, формирующийся из компонентов покрывающего флюса при SMAW и флюса при FCAW и SAW, покрывает металл шва во время сварки. Недостаточное удаление шлака приводит к тому, что он остается местами на по-

верхности валика шва, что не позволяет получить ровный шов и/или приводит к появлению шлаковых включений. Сварочные материалы компании Kobelco созданы таким образом, чтобы оптимизировать формирующие шлак компоненты в оболочке покрытых электродов, а также во флюсе FCW и SAW для упрощения удаления шлака.

На рис. 7 представлен внешний вид валика сварного шва и макроструктура стыкового соединения, полученного методом FCAW с PREMIARC™ DW-2594. На рис. 8 представлено такое же соединение, выполненное методом SAW с проволокой PREMIARC™ US-2209/флюсом PREMIARC™ PF-S1D. Сварочные материалы дуплексной нержавеющей стали компании Kobelco дают отличные механические свойства (см. табл. 2), высокую сопротивляемость язвенной коррозии и пористости, а также отличную удаляемость шлака.

Выбор сварочных материалов. При сварке дуплексных нержавеющей сталей рекомендуется выбирать сварочные материалы такой же или более высокой марки. Например, при сварке стандартной дуплексной нержавеющей стали можно выбрать сварочные материалы, эквивалентные AWS E2209 или E2594 (более высокой марки).

При сварке разнородных металлов – углеродистой стали или аустенитной нержавеющей стали и дуплексной нержавеющей стали, применяются сварочные материалы марки 309L или 309MoL, или предназначенные для дуплексных нержавеющей сталей.

Примечания по использованию. Сварочные операции для дуплексных нержавеющей сталей в целом сходны с операциями для аустенитных нержавеющей сталей, но при этом особое внимание должно уделяться тому, чтобы максимально использовать их сильные качества.

Ограничение погонной энергии. Ограничение погонной энергии широко распространено во всех сварочных процессах. Однако дуплексная нержавеющая сталь содержит больше хрома и молибдена, чем обычная. Если металл шва остывает слишком медленно из-за избыточной погонной энергии и его температура в течение долгого времени остается в промежутке от 700 до 800 °С, он трансформируется в сигма-фазу, что снижает ударную вязкость. С другой стороны, если скорость охлаждения металла шва излишне велика из-за слишком низкой погонной энергии, в околошовной зоне близко к сварной поверхности выделяется нитрид хрома, и в результате формируется слой с низким содержанием хрома. Это приводит к снижению сопротивления коррозии. Поскольку скорость охлаждения также влияет на ферритное число металла шва, необходимо избегать слишком высокой или слишком низкой погонной энергии. Американский институт нефти (API) рекомендует в качестве ориентира погонную энергию от 5 до 25 кДж.

Химическая формула защитного газа при GTAW. При сварке TIG для проварки корневого шва круговых соединений труб из нержавеющей

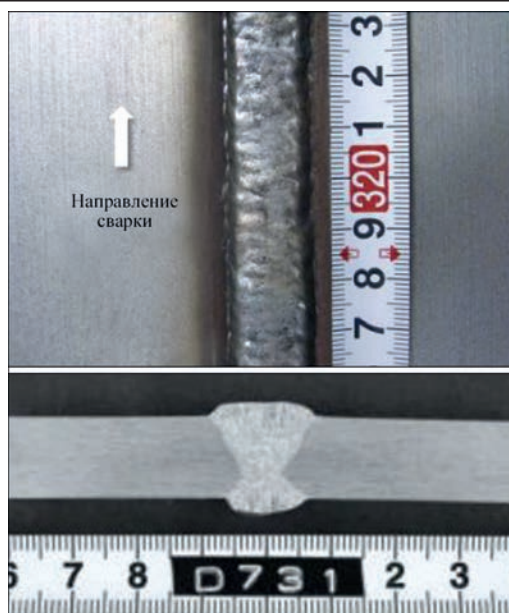


Рис. 7. Внешний вид валика сварного шва и макроструктура стыкового соединения DW-2594 (3G)

стали в качестве защитного газа обычно используется 100 % аргон. Однако если 100 % аргон используется в качестве защитного газа при сварке TIG со сплошным присадочным прутком для дуплексной нержавеющей стали, количество азота в металле шва может быть меньше, чем в присадочном прутке для TIG. Это происходит тогда, когда азот в присадочном прутке TIG не переходит полностью в металл шва; вместо этого, некоторое количество азота выходит в форме газа N_2 из сварочной ванны.

Это приводит к избытку феррита в металле шва и/или падению PREW, в результате чего может понизиться ударная вязкость и сопротивление язвенной коррозии. Чтобы избежать этого, рекомендуется добавить в состав защитного газа около 2 % газа N_2 , в зависимости от содержания азота в металле шва и/или основном металле.

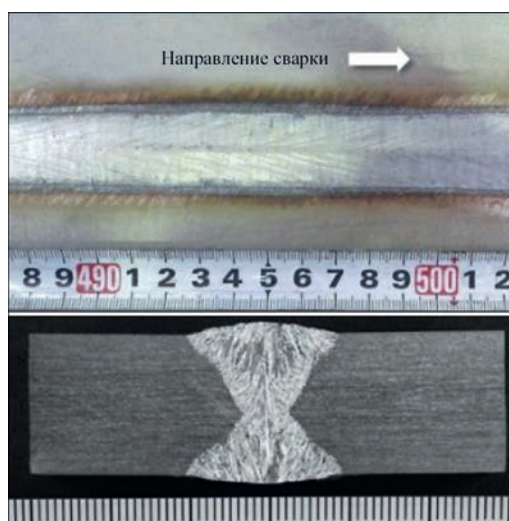


Рис. 8. Внешний вид валика сварного шва и макроструктура стыкового соединения US-2209 / PF-S1D (1G)

Предотвращение горячего растрескивания при SAW. Необходимо также отметить, что сварочные материалы дуплексной нержавеющей стали более подвержены горячему растрескиванию, чем сварочные материалы стандартной нержавеющей стали, за исключением сварочных материалов из полностью аустенитных нержавеющей сталей. В этом смысле существует высокий риск горячего растрескивания при сварке SAW, в которой, как правило, используется более высокая погонная энергия. Поскольку на склонность к горячему растрескиванию также влияет форма валика сварного шва, рекомендуется избегать узкощелевой сварки, высокого сварочного тока и высокой скорости сварки. Такие условия сварки должны быть тщательно проверены перед началом работ.

Заключение

В данной статье представлены дуплексные нержавеющей стали и сварочные материалы для них, предлагаемые компанией Kobe Steel. По прогнозам, применение дуплексных нержавеющей сталей продолжит расширяться в Японии и за рубежом.

Использованные источники

(2011) Сварочные материалы для супердуплексной нержавеющей стали. *Журнал Японского общества сварки*, 80, 2.

Сварка дуплексной нержавеющей стали. *Технология сварки*, февраль 2011.

(2010) Свариваемость нержавеющей сталей. *Журнал Японского общества сварки*, 79, 6.

API Технический отчет 938-C. Применение дуплексных нержавеющей сталей в нефтеочистной отрасли. Американский Институт нефти.

По материалам сайта <http://www.kobelco-welding.jp>

ІННОВАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ*

Сьюзан Райлі, Челсі Рабідо, press.mcelroy.com

Землеробство та посуха – поняття несумісні, і, незважаючи на всі досягнення технічного прогресу, іноді природа жорстоко карає людей. Так, наприклад, як це трапилось в Файрбозі, штат Каліфорнія, коли в новинах з'явилися знімки засохлих мигдалевих дерев, виритих із сухого ґрунту. Відома агрокомпанія Baker Farming була змушена викорчувати 20% насаджень мигдалевих дерев на території близько 1000 акрів. Рослини були абсолютно зневоднені, бо в Каліфорнії понад два роки не було дощів.

Каліфорнійське землеробство побудоване переважно на зрошенні, іноді вода транспортується на сотні миль. Щоб зберегти плодоносні мигдалеві дерева, які вижили, Baker Farming було необхідно швидко модернізувати іригаційну систему.

Протягом тривалого часу зрошення в цьому господарстві здійснювалося по 48-дюймовому сталевому трубопроводу. «Ця мережа експлуатувалася близько 17 років, і через корозію труби вода постійно витікала в землю», – пояснив Майкл Бронза – представник компанії «Rain for Rent» (Фресно, Каліфорнія, США), яку Baker Farming найняла, щоб замінити зношений трубопровід більш надійною і довговічною системою, при якій втрат води не було б. Передбачалося, що трубопровід протяжністю приблизно дві з половиною милі повинен бути прокладений по прямій лінії.

При розробці проекту пріоритетом стали вигоди відсутності витоків води та захист від корозії. Тому внаслідок доведеної на практиці довговічності і високої корозійної стійкості, вибір був зроблений на користь труб із поліетилену високої густини (ПЕВГ).

«Використання ПЕ цього типу дає нам можливість встановити систему трубопроводів, яка працюватиме в два і більше разів довше, ніж сталеві труби, – пояснив Майкл Бронза. – Ми запобігаємо витокам води, і це дуже важливо, особливо тут у Каліфорнії. Також слід враховувати, що система зрошення Baker Farming з'єднується з насосно-компресорними станціями, які пов'язані з Каліфорнійським акведуком» (система каналів, тунелів і трубопроводів, які транспортують



* За матеріалом статті, опублікованої в журналі «Полімерні труби» №2 (47), 2018