

СВАРКА ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

Д.С. Яковлев, М.В. Шахматов

Приведена оценка уровня ударной вязкости металла швов, выполненных многодуговой сваркой под слоем флюса. С использованием порошковой проволоки на примере пластин проведена сварка под слоем флюса. Приведены результаты химического анализа и механических испытаний сварных соединений, результаты микроисследования. На основе полученных результатов сделан вывод о возможности применения порошковой проволоки для сварки трубных сталей высокой прочности при одновременном повышении ударной вязкости сварных соединений за счет их легирования.

Ключевые слова: сварка труб, порошковая проволока, автоматическая сварка под слоем флюса, легирование.

В связи с ростом требований к газонефтепроводным трубам большого диаметра актуальной остается задача повышения ударной вязкости металла швов, выполненных многодуговой сваркой под слоем флюса. Эффективным способом решения является микролегирование швов титаном и бором, что улучшает структуру металла, способствуя образованию игольчатого феррита внутри зерен и подавлению выделений первичного феррита по их границам [1].

Известно, что для получения сварного соединения с высокой ударной вязкостью необходимым требованием является достижение определенного баланса между титаном, бором, кислородом, азотом, а также активными раскислительными элементами – алюминием, кальцием, редкоземельными металлами. Подавление формирования первичного феррита по границам зерен обеспечивается наличием бора, оставшегося после образования оксида B_2O_3 и нитрида BN. Зародышами для формирования игольчатого феррита внутри аустенитного зерна в основном являются дисперсные частицы оксида титана TiO , образовавшегося в результате соединения титана со свободным кислородом [2].

Несмотря на высокую стоимость, одним из главных преимуществ порошковой проволоки над проволоками сплошного сечения является возможность микролегирования сварного соединения в широких пределах. В работе [3], легирование многодугового шва выполнялось порошковой проволокой, причем оптимальное ее расположение было установлено на второй или третьей дуге.

С учетом этих рекомендаций, а также принимая во внимание результаты полученные в работе [4] были проведены экспериментальное исследование и оценка ударной вязкости сварных соединений, выполненных с использованием порошковой проволоки, легированной титаном, бором, молибденом и никелем. Для сварки было выбрано три марки порошковой проволоки (ПП-1, ПП-2, ПП-3) диаметром 4 мм, которые были установле-

ны на второй дуге. На остальных дугах использовали проволоку сплошного сечения. Для оценки свойств сварного соединения одна из пластин была сварена без использования порошковой проволоки.

По химическому составу выбранные для эксперимента порошковые проволоки схожи, но характеризуются рядом отличий:

1) проволоки ПП-1 и ПП-2 легированы Ti, Mo, Ni, при этом содержание Ni в проволоке ПП-1 значительно выше;

2) проволока ПП-3 микролегирована Ti и Mo.

Сочетания сварочных проволок сплошного сечения и порошковой проволоки подбирались таким образом, чтобы наплавленный металл имел близкий химический состав (за исключением содержания Ni).

На лабораторном сварочном стане были сварены пластины из стали класса прочности K65 с толщиной стенки 27,7 мм (табл. 1). Технологический шов был выполнен автоматической сваркой в смеси защитных газов ($Ar+CO_2$), внутренний и наружный шов – 4- и 5-дуговой автоматической сваркой под флюсом. Режимы сварки пластин одинаковые.

Сваренные пластины прошли визуальном-измерительный и радиографический контроль, который показал отсутствие дефектов.

От сварных соединений пластин были отобраны образцы для испытаний на растяжение, ударный изгиб, определения химического состава сварных швов и микроисследования.

Результаты химического анализа приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что сварные соединения имеют достаточно близкий химический состав, за исключением ПП-1 и ПП-2, где содержание Ni выше. Небольшие отличия в содержании Mn и Si объясняются металлургической активностью флюса.

Результаты испытаний сварных соединений на растяжение и ударный изгиб приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 1

Варианты сварки пластин

Номер соединения	Основной металл	Сварочный материал
Пл-1	Пластины из стали класса прочности К65 с толщиной стенки 27,7 мм	Сочетание проволок сплошного сечения с порошковой проволокой ПП-1
Пл-2		Сочетание проволок сплошного сечения с порошковой проволокой ПП-2
Пл-3		Сочетание проволок сплошного сечения с порошковой проволокой ПП-3
Пл-4		Сочетание проволок сплошного сечения

Таблица 2

Химический состав сварных соединений

№	Шов	Массовая доля элементов, %														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Al	Mo	Ti	Nb	B	Ca
Пл-1	Нар	0,07	1,72	0,39	0,011	0,004	0,07	0,82	0,08	0,018	0,012	0,25	0,018	0,03	0,0015	0,0005
	Вн.	0,07	1,82	0,44	0,012	0,004	0,07	0,80	0,07	0,016	0,013	0,20	0,019	0,04	0,0018	0,0004
Пл-2	Нар.	0,07	1,56	0,27	0,011	0,003	0,07	0,59	0,07	0,02	0,01	0,25	0,025	0,03	0,0025	0,0002
	Вн.	0,07	1,63	0,29	0,011	0,003	0,07	0,61	0,07	0,02	0,02	0,21	0,034	0,04	0,0032	0,0003
Пл-3	Нар.	0,06	1,69	0,31	0,010	0,003	0,06	0,12	0,07	0,02	0,01	0,22	0,030	0,03	0,0024	0,0002
	Вн.	0,06	1,76	0,28	0,010	0,003	0,07	0,14	0,07	0,02	0,01	0,23	0,031	0,03	0,0026	0,0002
Пл-4	Нар.	0,07	1,58	0,28	0,015	0,004	0,07	0,13	0,07	0,02	0,001	0,19	0,025	0,04	0,0024	0,0001
	Вн.	0,07	1,58	0,23	0,014	0,005	0,07	0,15	0,07	0,02	0,01	0,22	0,023	0,04	0,0022	0,0003

Таблица 3

Испытания сварного соединения на растяжение,
образцы цилиндрические продольные от наружного шва

Номер образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Пл-1	640	710	23,5
Пл-2	650	720	25,0
Пл-3	620	710	23,5
Пл-4	620	690	23,0

Таблица 4

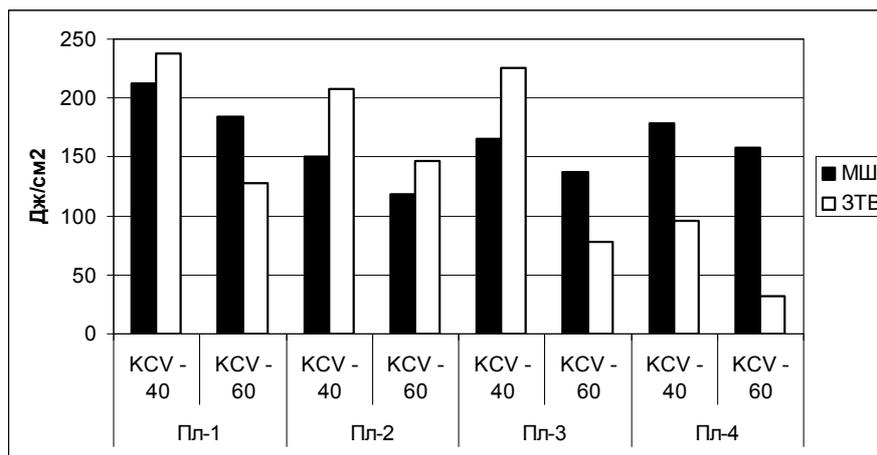
Испытания сварного соединения на ударный изгиб KCV,
образцы поперечные 2 мм от наружной поверхности

Номер образца	Ударная вязкость, Дж/см ²											
	KCV при -40°C						KCV при -60°C					
	Металл шва			ЗТВ			Металл шва			ЗТВ		
Пл-1	252	193	191	240	233	241	207	180	165	87	163	134
Пл-2	169	144	135	186	244	193	133	132	89	173	61	206
Пл-3	174	143	179	215	221	243	83	160	169	81	104	50
Пл-4	158	234	146	128	98	63	146	188	141	30	38	30

Согласно данным табл. 3, величины предела текучести и предела прочности металла всех образцов сварных соединений сопоставимы.

Испытания сварного соединения на ударный изгиб KCV (см. табл. 4) показывают, что при температурах испытания -40 и -60 °С образцы с надрезом по металлу шва имеют достаточно хорошую

ударную вязкость. При нанесении надреза по ЗТВ ударная вязкость сварных соединений, выполненных с применением порошковой проволоки, выше, чем при сварке проволоками сплошного сечения. Наилучшими показателями ударной вязкости обладает сварное соединение Пл-1, выполненное с применением порошковой проволоки ПП-1. На рисунке



Средние значения ударной вязкости сварных соединений

приведена диаграмма, построенная по средним значениям ударной вязкости.

В результате проведенного микроисследования выявлено, что микроструктура металла сварных швов Пл-1 и Пл-2 бейнитная мелкодисперсная с тонкими ферритными прослойками между кристаллитами. Сварные швы Пл-3, Пл-4 характеризуются более крупной структурой и не отличаются мелкодисперсностью.

Выводы

Результаты проведенных испытаний на ударный изгиб свидетельствуют о том, что микролегирование сварных швов титаном и бором повышает ударную вязкость сварных соединений, при этом дополнительное легирование Ni (см. рисунок, пластины Пл-1 и Пл-2) также способствует увеличению уровня ударной вязкости при низких температурах.

Сварные соединения, выполненные с применением порошковой проволоки, имеют более высокие значения ударной вязкости на образцах с надрезом по ЗТВ (по сравнению со сварными соединениями, выполненными проволоками сплошного сечения).

Обобщая таким образом результаты данного исследования и результаты работы [4], можно сделать вывод, что применение порошковой проволоки для сварки трубных сталей высокой прочности является одним из путей повышения ударной вязкости сварных соединений за счет широкой возможности легирования сварных соединений, в ча-

стности Ti и Ni. Кроме того, применение порошковой проволоки даже на одной из дуг благодаря высокому коэффициенту расплавления позволит несколько снизить погонную энергию, что оказывает благоприятное влияние на микроструктуру сварного шва и, как следствие, на механические свойства. Соответственно, одним из эффективных путей в получении сварных соединений с высокими механическими характеристиками в процессе сварки порошковой проволокой является решение задачи подбора оптимального химического состава порошковой проволоки.

Литература

1. Микролегирование швов титаном и бором при многодуговой сварке газонефтепроводных труб большого диаметра / Л.И. Файнберг, А.А. Рыбаков, А.Н. Алимов, Р. Розерт // Автоматическая сварка. – 2007. – № 5. – С. 20–25.
2. Подгаецкий, В.В. О влиянии химического состава шва на его микроструктуру и механические свойства / В.В. Подгаецкий // Автоматическая сварка. – 1991. – № 2. – С. 1–9.
3. Engindeniz, E. Unterpulver – Hochleistungsschweissen mit Fülldrahtelektroden / E. Engindeniz // Ibid. – 1994. – № 130, April. – S. 11–20.
4. Яковлев, Д.С. Анализ различных типов сварочных проволок для сварки трубных сталей при толщинах более 25,0 мм / Д.С. Яковлев // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Металлургия». – 2012. – Вып. 11, № 5 (12). – С. 30–32.

Яковлев Дмитрий Сергеевич, инженер-исследователь группы технологии сварки, ОАО «Челябинский трубопрокатный завод». 454129, г. Челябинск, ул. Машиностроителей, 21. E-mail: dmitriy.yakovlev88@hotmail.com.

Шахматов Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет. Тел.: (351)2679960.

FLUX-CORED WELDING PIPES MADE FROM HIGH-STRENGTH STEELS

D.S. Yakovlev, M.V. Shakhmatov

The article presents the assessing of the level of the impact toughness of metal weld made by multiarc submerged arc welding. Submerged arc welding using cored wire is performed with plates as an example. The article presents the results of mechanical tests, chemical analysis and micro-structural study of the welded joints. The obtained results permitted to draw a conclusion about the possibility of using cored wire for welding pipes made of high-strength steels leading to the increase of impact toughness of welds due to their alloying.

Keywords: pipe welding, flux cored wire, automatic submerged arc welding, alloying.

Yakovlev Dmitriy Sergeevich, research engineer of the Welding Technology Group, JSC "Chelyabinsk Pipe-Rolling Plant". 21 Mashinostroiteley street, Chelyabinsk, Russia 454129. E-mail: dmitriy.yakovlev88@hotmail.com.

Shakhmatov Mikhail Vasil'evich, doctor of engineering science, professor, head of the Welding Equipment and Technology Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351)2679960.

Поступила в редакцию 15 марта 2013 г.