

## **Особенности технологии автоматической сварки порошковыми проволоками в защитных газах неравнотолщинных и неравнопрочных сталей для трубной арматуры.**

*Д.т.н. Карасев М.В., Работинский Д.Н., Шапиро Я.О. (ЗАО «НПФ «ИТС»)*

При сварке трубных отводов и арматуры (задвижки, краны и т.д.) широко используются соединения, выполненные из неравнопрочных и неравнотолщинных трубных сталей. К таким соединениям относится, например, приварка к корпусу (патрубку) шаровых кранов из стали класса прочности К48-К54 переходных колец, выполненных из сталей класса прочности К60.

Типовыми сварными соединениями в узлах трубопроводной арматуры являются стыковые соединения «кольцо 1420x36,4x400 из стали 09Г2С с переходным кольцом 1420x26,4x800 из стали К60» или «кольцо 600x25x160 из стали 09Г2С с переходным кольцом 530x20x500 из стали К60».

Разработка технологии автоматической сварки в защитных газах неповоротных стыков трубной арматуры имеет ряд особенностей. К ним относятся:

- - использование специальных головок для автоматической сварки;
- - правильный выбор сварочных материалов;
- - использование специальных технологий автоматической сварки, обеспечивающих требуемые механические свойства и внешний вид сварных соединений из неравнопрочных сталей.

Таким образом, при разработке технологии сварки указанных соединений необходимо использовать комплексный подход. Комплексный подход заключается в определении и исследовании основных компонентов следующей аппаратурно-технологической цепочки: внешний вид сварного шва - механические свойства сварного шва - производительность процесса сварки - сварочный материал - источник питания для сварки - управление головкой и источником - конструкция сварочной головки - технология сварки неповоротных кольцевых стыков трубопроводов.

Такой подход реализован фирмой ЗАО НПФ «ИТС» (г. Санкт-Петербург) при внедрении технологий сварки трубных узлов и арматуры на ОАО «Тяжпромарматура» (г. Алексин), ОАО «Тяжпрессмаш» (г. Рязань), ЗАО «СОТ» (г. Челябинск).

При реализации этой задачи использовались следующие основные составляющие технологии:

- - комплекс «ПРОТЕУС» для автоматической сварки порошковыми проволоками в защитных газах заполняющих и облицовочных слоев шва;
- - сварочный выпрямитель ВД-506ДК для сварки всех слоев шва;
- - механизм подачи проволоки типа ПДГО-511 для сварки корневого слоя шва;
- - порошковая проволока POWER PIPE 60R для сварки трубных сталей с классом прочности до К60 включительно;
- - порошковая проволока POWER PIPE 60R для сварки трубных сталей с классом прочности К65.

Сварочное оборудование для автоматической сварки заполняющих и облицовочных слоев шва в среде защитных газов порошковой проволокой должно позволять осуществлять сварку неповоротных стыков трубопроводов и трубопроводной арматуры диаметром от 325 до 2 540 мм, толщиной стенок от 8 мм до 38 мм в цеховых и трассовых условиях.

Дополнительными требованиями к головкам при сварке узлов из разнотолщинных сталей являются:

- - возможность механизированного хода сварочной горелки в осевом и поперечном направлениях на величину не менее 50мм, что необходимо для сварки указанных выше толщин стенки колец;
- - возможность наклона горелки на угол не менее 15° в направлении, поперечном сварному шву, и выполнение осцилляций горелки при этом угле наклона, что необходимо для выполнения облицовочных проходов (см. рис1);
- - ширина осцилляций горелки должна быть не менее 14° в каждую сторону;
- - номинальный сварочный ток горелки и источника питания должны быть не менее 315А при ПВ60% для обеспечения бесперебойной работы головки при заполнении указанных толщин;
- - время задержки горелки на кромках должно программно регулироваться в пределах 0...0,5с для обеспечения качественной облицовки сварных соединений с указанным перепадом диаметров и толщин;
- - расстояние от края направляющего пояса до оси разделки должно быть не более 55 мм для обеспечения работы в стесненных условиях;
- - количество программируемых каналов на головке должно быть не менее 12, что необходимо для выполнения сварного соединения с указанной толщиной стенки и числом проходов не менее 12.
- - сварочный источник питания должен обеспечивать работу при пониженных напряжениях на дуги, что необходимо для обеспечения нормативного внешнего вида сварного шва.

Указанным требованиям отвечает комплекс «ПРОТЕУС» со сварочным выпрямителем ВД-506ДК. На рис.1 показан внешний вид разнотолщинного сварного соединения и процесс сварки на комплексе «ПРОТЕУС» (приварка патрубков к шиберной задвижке, процесс автоматической сварки порошковыми проволоками в защитных газах и процесс сварки деталей трубной арматуры).



Рис.1 Внешний вид разнотолщинного сварного соединения и процесс сварки на комплексе «ПРОТЕУС» порошковыми проволоками типа POWER PIPE 60R.

На рис.2 показан внешний вид головки «ПРОТЕУС» и процесс программирования головки. Как следует из рис.1, особенностью сварки указанных выше толщин является значительное число слоев при заполнении разделки и многопроходная облицовка сварного соединения.

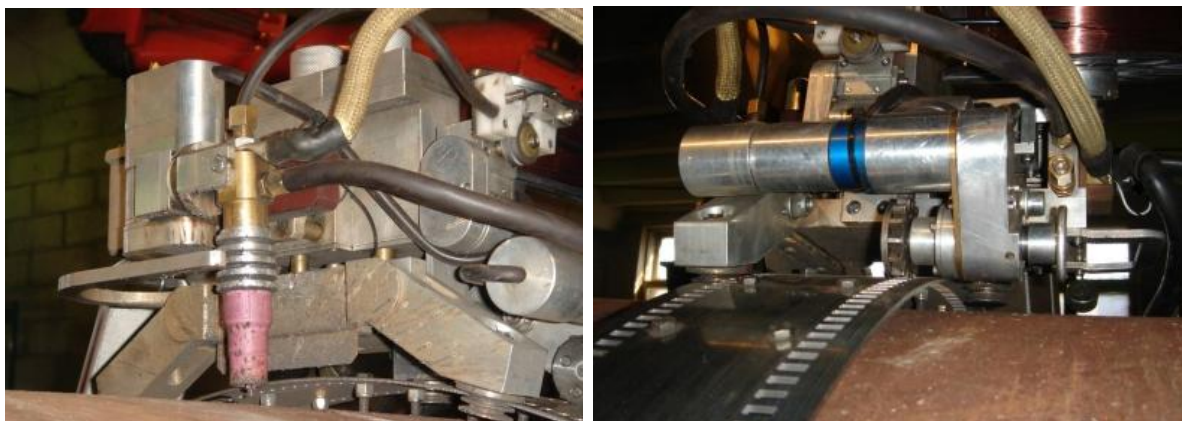




Рис.2 Внешний вид головки «ПРОТЕУС» и процесс программирования головки на 12 каналов.

Многопроходное выполнение сварного соединения, особенно облицовочных проходов, накладывают ограничения на использование других источников питания сварочных головок «ПРОТЕУС». При сварке порошковыми проволоками в смеси защитных газов необходимо применять сварочные источники, обеспечивающие стабильную работу при пониженных напряжениях сварочной дуги.

Возможность сварки в области пониженных напряжений на дуге повышает стабилизацию сварочной ванны при использовании широкого диапазона толщин стенки и разделок кромок свариваемого металла, обеспечивает минимальное подтекание сварочной ванны при сварке в потолочном пространственном положении, ограничивает нагрев околошовной зоны. Это снижает термические деформации и влияние сварки на структуру металла околошовной зоны, что имеет принципиальное значение при сварке разнопрочных трубных сталей.

Обеспечение стабильной работы источников сварочного тока при пониженных напряжениях на дуге (менее 24В) и токах дуги более 200А достигается в специализированных сварочных выпрямителях с подачей дополнительного импульса напряжения на электродный промежуток в момент роста капли на торце электродной проволоки. Прочие сварочные выпрямители, а также инверторные источники общего назначения не обеспечивают стабильного горения дуги при пониженном напряжении на дуге.

К выпрямителям, которые обеспечивают стабильную работу при пониженных напряжениях на дуге относятся установки ВД-506ДК и ВДУ-511, выпускаемые ЗАО НПФ «ИТС». Метод подачи импульса может быть различным – неуправляемый импульс от разряда конденсаторных батарей, реализованный в ВДУ-511, или управляемый импульс от разряда дополнительной индуктивности, реализованный в ВД-506ДК. Подача дополнительной энергии в дуговой промежуток обеспечивает высокие динамические свойства источника питания, достигаемые ранее только при использовании инверторных источников питания. Все указанные сварочные выпрямители имеют климатическое исполнение УЗ, обеспечивающее работу при температурах эксплуатации от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  и могут использоваться в качестве источника сварочного тока при работе совместно с головками ПРОТЕУС.

Для сварки узлов из разнотолщинных разнородных аттестован сварочный выпрямитель ВД-506ДК, который обладает возможностью регулировки величиной импульса сварочного тока в момент роста капли на торце электродной проволоки и используется кроме традиционного процесса автоматической сварки порошковыми проволоками, еще и для процесса автоматической сварки корня шва. На рис.3 приведен общий вид выпрямителя ВД-506ДК и его технические характеристики.

	Напряжение питающей сети, В	MMA	TIG	MIG/MAG
		3'380		
	Частота питающей сети	50		
	Номинальный сварочный ток, А (ПВ, %)	400(100), 500(60)		
	Пределы регулирования сварочного тока, А	50-500	12-500	60-500
	Номинальное рабочее напряжение, В	36	26	34
	Напряжение холостого хода, В	52-осн.эл. 84-цел.эл.	84,5	82
	Потребляемая мощность, кВА, не более	29		
	Первичный ток, А При токе 400А (ПВ100%)	60		
	Первичный ток на холостом ходу, А (при напряжении холостого хода 84В)	3,3		
	Масса, кг, не более	175		
	Габаритные размеры, мм, не более Длина, ширина, высота	750x390x770		

Рис.3 Общий вид и технические характеристики специализированного выпрямителя ВД-506ДК.

Для повышения производительности, при сварке комплексом ПРОТЕУС использованы бесшовные порошковые проволоки марки POWER PIPE 60R для сварки сталей классов прочности от К54 до К60 включительно и марки POWER PIPE 90R для сварки стали класса прочности К65.

Выбор бесшовных проволок обусловлен двумя факторами. Бесшовные порошковые проволоки отличаются от традиционных шовных (вальцованных) порошковых проволок технологией производства. Различие заключается в том, что шовные проволоки вальцуются на валках, а бесшовные проволоки волочатся через фильеры. Это обуславливает различие в плотности и весе проволок. Вес 1 м шовной проволоки диаметром 1,2 мм составляет 6,4 г, а вес 1 м бесшовной проволоки составляет 7,3 г. Это обуславливает повышение производительности процесса сварки при одинаковых скоростях подачи на 14% и увеличивает темп сварочных работ.

Бесшовная проволока, как показано на рис.4 – герметична, не имеет вальцованного соединения в виде стыка, в результате чего она может храниться и применяться при повышенной влажности без ущерба качеству сварки. Шовная проволока (рисунок 4) имеет стык, через который может попадать влага, что требует особых условий ее хранения и использования.



Бесшовная порошковая проволока (ОАО «ЭСВА», Калининград, «Оэрликон»)



Шовная (вальцованная) порошковая проволока (ЭСАБ, ЛИНКОЛЬН и др.)

Рисунок 4. Структура бесшовной и шовной (вальцованной) порошковых проволок различных производителей.

Химический состав наплавленного металла при использовании порошковой проволоки марки POWER PIPE 60R в комбинации с различными защитными газами приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав наплавленного металла при использовании порошковой проволоки марки POWER PIPE 60R

Назначение проволоки	C%	Mn%	Si%	Ni	P%	S%
Общего назначения (для сварки сталей класса прочности К 60 в смеси газов Ar 82%/CO <sub>2</sub> 18%)	<0,07	1,2-1,75	0,35-0,60	0,6-1,0	<0,015	<0,015
Общего назначения (для сварки сталей класса прочности K54) в смеси газов Ar 75% CO <sub>2</sub> 25%)	<0,07	1,0-1,65	0,25-0,55	0,5-1,0	<0,015	<0,015
Общего назначения ( в среде CO <sub>2</sub> )	<0,07	1,0-1,45	0,2-0,5	0,4-0,9	<0,015	<0,015
Специального назначения (для уникальных объектов для сварки сталей класса прочности К 60 в смеси газов Ar 75% CO <sub>2</sub> 25%)	<0,07	1,25-1,65	0,40-0,55	0,7-1,0	<0,015	<0,015

Значения механических свойств наплавленного металла при использовании порошковых проволок марок POWER PIPE 60R и POWER PIPE 90R в комбинации с различными защитными газами приведены в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства наплавленного металла при использовании порошковых проволок марок POWER PIPE 60R и POWER PIPE 90R.

Тип проволоки и назначение	Предел текучести, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), $\sigma_t$	Временное сопротивление разрыву, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), $\sigma_b$	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV, Дж/см <sup>2</sup> при t <sub>0</sub> C		
				-20 <sup>0</sup>	-40 <sup>0</sup>	-60 <sup>0</sup>
POWER PIPE 60R общего назначения для сварки в смеси Ar 82% / CO <sub>2</sub> 18%	>480 (49)	>590 (60)	≥21	≥80	≥50	≥35
POWER PIPE 60R общего назначения для сварки в смеси Ar 75% / CO <sub>2</sub> 25%	>440 (45)	>560 (56)	≥21	≥80	≥50	≥35
POWER PIPE 60R общего назначения для сварки в CO <sub>2</sub>	>440 (45)	>530 (54)	≥21	≥80	≥50	≥35
POWER PIPE 60R специального назначения для сварки в смеси Ar 75% / CO <sub>2</sub> 25%	>480 (49)	>590 (60)	≥21	≥80	≥50	≥35
POWER PIPE 90R для сварки в смеси Ar 75% / CO <sub>2</sub> 25%)	>560 (57)	>630 (64)	≥21	≥80	≥50	≥35

Проволока POWER PIPE 60R выпускается в двух исполнениях – общего назначения и для уникальных проектов. В проволоке POWER PIPE 60R, выпускаемой для уникальных проектов, химический состав наплавленного металла находится в более узких пределах, чем в проволоке общего назначения.

При разработке химического состава порошковых проволок POWER PIPE 60R и POWER PIPE 90R был применен метод микролегирования состава проволоки титаном и бором. Микролегирование является очень важной составляющей частью порошковых проволок, производимых в группе ИТС, особенно при сварке высокопрочных сталей.

Микролегирование позволяет при кристаллизации сварочной ванны обеспечить наличие многих центров кристаллизации, что разориентирует направленный рост дендритов, уменьшает их размер и повышает ударную вязкость сварного соединения.

Наличие титана способствует образованию игольчатого феррита внутри зерен, подавляет выделение первичного феррита по границам зерен. При этом, содержание титана в металле шва должно быть в пределах 0,035 - 0,055%. Зародышами для формирования игольчатого феррита внутри аустенитного зерна являются в данном случае дисперсные частицы оксида титана. Превышение содержания титана выше указанных значений ведет к охрупчиванию металла шва, а снижение ниже минимального предела – к потере положительного эффекта.

Наличие микродобавок бора в пределах 0,0025-0,005 % способствует уменьшению скорости роста зерна в металле шва и, как следствие, к повышению вязко-пластических свойств металла шва. В тоже время, увеличение содержания бора более 0,006% вызывает охрупчивание металла шва.

При сварке неравнопрочных трубных сталей, в соответствии с СТО Газпром 2–2.2–136–2007 [1], необходимо выбирать сварочный материал, исходя из механических свойств основного металла с более высокими механическими характеристиками.

При сварке таких сталей формируется сварное соединение с переменным химическим составом, обусловленным различным легированием основного металла. Со стороны высокопрочного основного металла образуется более легированный и высокопрочный металл шва. Со стороны низкопрочного основного металла степень легирования металла шва за счет перемешивания с низколегированным основным металлом снижается, что вызывает снижение прочностных характеристик.

В таблице 3 приведены значения ударной вязкости образцов, вырезанных из различных зон средней части сварного соединения «кольцо 1420x36,4x400 из стали 09Г2С с переходным кольцом 1420x26,4x800 из стали К60».

Таблица 3. Результаты испытаний на ударную вязкость по Шарпи при температуре испытания -40<sup>0</sup>C образцов из различных зон средней части сварного соединения «кольцо 1420x36,4x400 из стали 09Г2С с переходным кольцом 1420x26,4x800 из стали К60».

Тип образца	Место надреза	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>		Заключение
		Значения	Среднее	
IX по ГОСТ 6996-66	Ось шва	151,144,150,148,137,139	146	Соответствует «Инструкции по сварке Бованенково-Ухта»
	ЛС (шов +09Г2С)	79,64,78,69,70,71	72	
	ЛС (шов +К60)	160,164,159,160,158,165	161	
	ЛС+2мм (шов +09Г2С)	80,79,82,80,84,80	81	
	ЛС+2мм (шов +К60)	180,179,180,182,178,180	180	

Из анализа данных таблицы 3 следует, что в результате перемешивания основного металла и наплавленного металла при сварке порошковой проволокой POWER PIPE 60R, сформировалось сварное соединение с различными значениями ударной вязкости по сечению сварного шва. Свойства максимальны в зоне, где произошло перемешивание со сталью класса прочности К60 и минимальны в зоне, где произошло перемешивание со сталью 09Г2С. Однако, сварное соединение по всему сечению шва отвечает требованиям нормативной документации [2].

При испытаниях на статическое растяжение, разрушение произошло по стали 09Г2С, при испытаниях на статический изгиб, разрушение произошло при угле загиба 122 градуса, испытания на твердость металла шва и зоны термического влияния показали, что по металлу шва  $HV_{10} \leq 280$ , по зоне термического влияния обеих марок основного металла  $HV_{10} \leq 325$ , что соответствует требованиям нормативной документации [2].

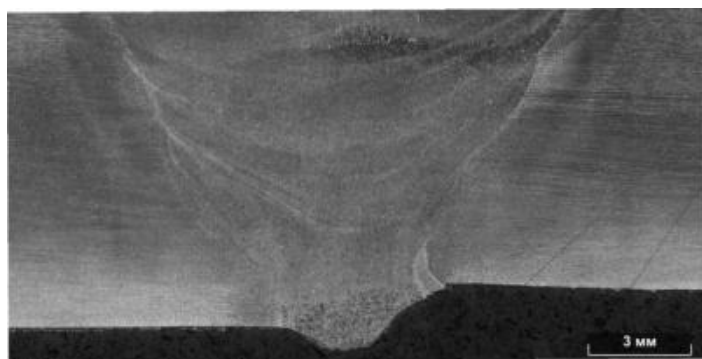
При сварке неповоротных стыков трубопроводов с большой толщиной стенки (более 20 мм) и разнотолщинных сварных соединений возникают особенности применения сварочных материалов с микролегированием, что связано с требованием нормативной документации определять ударную вязкость в корневой и верхней зоне сварного соединения [1]. С одной стороны, содержание микролегирующих элементов должно находиться в достаточно узких пределах. С другой стороны, при сварке прикорневой части шва (горячий проход, первые 2-3 заполняющих слоя) происходит интенсивное перемешивание наплавленного и основного металла, в результате чего общий уровень микролегирования металла шва в прикорневой зоне снижается.

Поэтому, при выборе состава порошковой проволоки при сварке трубных сталей толщиной более 20 мм необходимо учитывать, что содержание микролегирующих добавок в металле шва прикорневой зоны, где перемешивание интенсивное и в остальной части разделки, где перемешивание невелико, будет разным. Если микролегирование металла шва, в результате перемешивания с основным металлом, снижается ниже оптимальных значений, то значения ударной вязкости и механических свойств металла шва снижаются. При использовании проволоки POWER PIPE 60R для сварки разнопрочных сталей класса прочности К52-К56 указанные факторы важны, но не имеют такого принципиального значения, как при сварке высокопрочных сталей. Это связано с тем, что основного легирования проволоки POWER PIPE 60R достаточно для обеспечения равнопрочности сварных соединений из сталей класса прочности К52-К56 и наличие микролегирующих добавок не имеет особого значения.

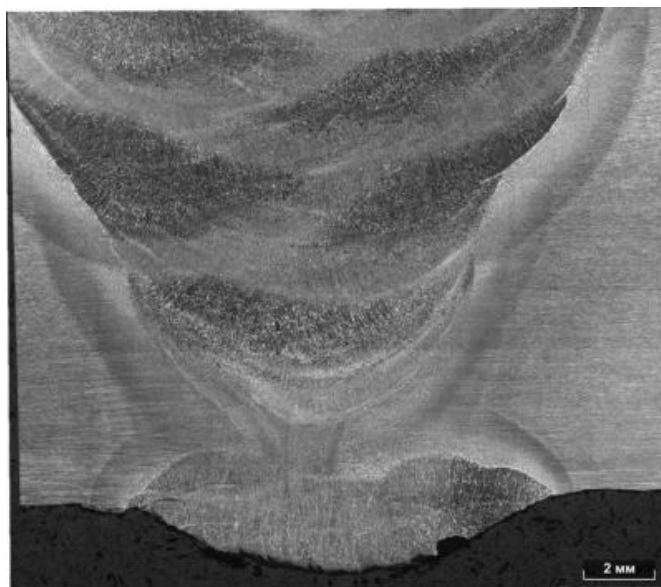
При сварке разнопрочных сталей, где в качестве одной составляющей используется высокопрочная сталь класса прочности К60 или К65, микролегирование имеет принципиальное значение.

На рисунке 5 показаны макрошлифы корневой зоны сварного соединения из стали К65 производства ОАО «Ижорский трубный завод» при оптимальном (а) и при заниженном (б) содержании микролегирующих добавок в металле шва. Сварка производилась порошковой проволокой марки POWER PIPE 90R с различным уровнем микролегирования.

Из анализа рисунка 5а следует, что при суммарном содержании микролегирующих добавок 0,05% в металле шва образуется структура с минимальным количеством средних дендритов. Действие микролегирования эффективно, ударная вязкость металла шва составляет 65-100 Дж/см<sup>2</sup>. На рисунке 5б приведена структура сварного соединения, где суммарное содержание микролегирующих добавок в металле шва составляет 0,02%. В этом образце наблюдаются крупные дендриты. Действие микролегирования неэффективно, ударная вязкость металла шва составляет 20-35 Дж/см<sup>2</sup>.



а)



б)

Рисунок 5. Макрошлиф корневой зоны сварного соединения из стали К65 при оптимальном (а) и заниженном содержании (б) микролегирующих добавок в металле шва.

Изготовление проволок марок POWER PIPE 60R и POWER PIPE 90R выполнялось с учетом указанных факторов, при этом оптимальное содержание основных легирующих элементов и микроэлементов в порошковых проволоках определялось с учетом сварки всех слоев шва.

Для эффективного действия микролегирования и достижения высоких вязко-пластических свойств сварного соединения при отрицательных температурах, крайне важно придерживаться технологии сварки, обеспечивающей минимальный градиент температуры по сечению сварочной ванны при её кристаллизации. Это достигается минимизацией размеров сварочной ванны за счет контроля поперечных колебаний сварочной горелки и снижения напряжения на дуге.

Реализация указанных требований возможна при применении источников питания, обеспечивающих стабильную работу при пониженных напряжениях на дуге, и сварочных головок, оснащенных точными механизмами осцилляции сварочной горелки. В этом заключается взаимосвязь выбора сварочного оборудования и сварочных материалов, которая определяется технологией сварки.

При увеличении напряжения на дуге более 26 В и токах дуги в диапазоне 200-260А, что характерно для большинства традиционных сварочных источников, включая подавляющее большинство сварочных инверторов, происходит выгорание микролегирующих добавок. Использование сварочных выпрямителей ВДУ-511 или ВД-506ДК, обеспечивающих стабильную работу при сниженных напряжениях на дуге, совместно с применением порошковых проволок с микролегированием при автоматической сварке на комплексе «ПРОТЕУС», обеспечивает оптимальный химический состав наплавленного металла и металла шва при сварке разнопрочных трубных сталей.

Система управления сварочной головкой «ПРОТЕУС» позволяет стабилизировать процесс перемешивания металла шва с основным металлом и гарантировать равные условия кристаллизации всех слоев шва при технологических изменениях скорости сварки, обеспечивая при этом необходимую точность осцилляции.

### Выводы

1. - Показано, что при сварке разнопрочных сталей, где в качестве одной составляющей используется высокопрочная сталь класса прочности К60 или К65, принципиальное значение имеет согласование взаимосвязанных факторов при выборе источника питания, типа сварочной порошковой проволоки и исполнительных механизмов сварочной головки.
2. - Применение источников питания ВДУ-511, ВД-506ДК обеспечивает стабильную работу в области типовых режимов автоматической сварки порошковыми проволоками в области пониженных значений напряжения на дуге (ток дуги 200-250А и напряжение на дуге 22-23,5В) в смесях газов типа М21 и точное поддержание установленных значений режимных параметров.
3. - Применение бесшовной порошковой проволоки обеспечивает увеличение производительности сварки на 14% по сравнению с вальцованными порошковыми проволоками при равных скоростях подачи проволок.
4. - Применение порошковых проволок марок POWER PIPE 60R, POWER PIPE 90R с микролегирующими добавками позволяет в выбранном диапазоне режимных параметров сварочного источника получать состав металла шва, достаточный для обеспечения равнопрочности сварных соединений с основным



металлом соответствующего класса прочности, и обеспечивающий требуемую ударную вязкость металла шва и ЗТВ во всем диапазоне толщин стенки, включая прикорневую зону шва.

5. - Исполнительные механизмы и система управления сварочной головкой «ПРОТЕУС» обеспечивают точность позиционирования горелки по свариваемому стыку и равные условия кристаллизации слоев шва при изменении скорости сварки в различных пространственных положениях головки, а конструктивное исполнение головки «ПРОТЕУС» обеспечивает выполнение специфических требований при сварке разнопрочных и разнотолщинных элементов трубопроводов.
6. - Разработанная технология сварки и выбранное сварочное оборудование внедрены на ЗАО «СОТ» (г. Челябинск), ОАО «Тяжпромарматура» (г. Алексин), ОАО «Тяжпромаш» (г. Рязань) при изготовлении деталей трубопроводной арматуры, и могут лечь в основу адаптивных технологий сварки неповоротных кольцевых стыковых соединений трубопроводов и трубопроводной арматуры.

### **Библиография**

1. - Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов Часть I - М.: ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности», 2007, 241 с.
2. - Инструкция по сварке МГ Бованенково – Ухта с рабочим давлением до 11,8 МПа. Часть I. Основные требования, технологии сварки и контроль качества сварных соединений - М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008, 201 с.