



МЕХАНИЗИРОВАННАЯ РЕМОНТНАЯ СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ АГРЕГАТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА*

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук, **В. Н. ИГНАТЮК**, инж., **А. С. КОТЕЛЬЧУК**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

Ю. М. ГИТИН, инж. (Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского, г. Днепропетровск)

На основе экспериментальных исследований техники сварки самозащитной порошковой проволокой типичных соединений агрегатов металлургического комплекса определены технологические показатели и производительность сварки при использовании проволоки трех типов. Показана целесообразность использования проволоки двухслойной конструкции при сварке металла средней и большой толщины в нижнем и горизонтальном положениях швов. Проволоку трубчатой конструкции малого диаметра целесообразно использовать при выполнении швов в вертикальном и потолочном положениях. Разработана технология сварки типичных металлоконструкций.

Ключевые слова: дуговая сварка, ремонт металлоконструкций, низколегированные стали, металлургический комплекс, порошковая проволока, разработка состава

Сегодня актуальной проблемой при выполнении ремонтно-восстановительной сварки металлоконструкций из низколегированных сталей в цеховых условиях и при монтаже металлургического оборудования является повышение ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин. Одним из эффективных путей ее решения является применение высокопроизводи-

тельной и качественной механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой.

Корпусы доменных печей, конверторов, ковшей изготавливаются из низколегированных сталей, в частности, стали 09Г2С, требования к свойствам сварочных материалов отвечают типу Е50А согласно ДСТУ (ГОСТ 9467–75). Типичными соединениями являются стыковые с раскрытием кромок в 50° (для нижнего и вертикального проектного положения) и в 45° (для горизонтального с односторонним раскрытием). Толщина металла составляет от 12 до 60 мм, базовая — 30 мм. Соединения монтируются со щелью по корню шва 1...3 мм (рис. 1).

Необходимо было создать самозащитную порошковую проволоку, которую можно было бы

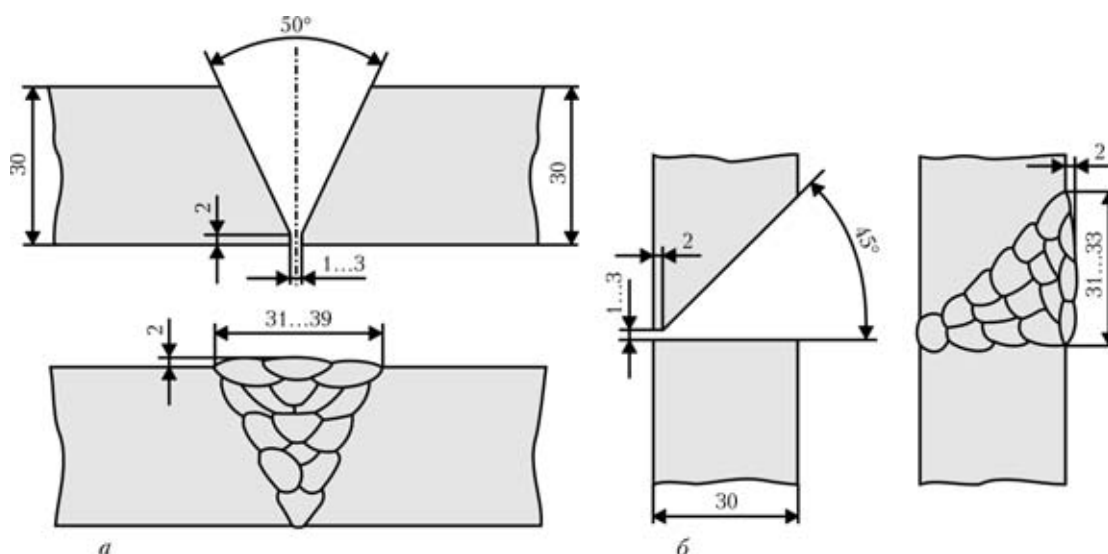


Рис. 1. Типы стыковых соединений на вертикальной плоскости корпусов проковшей и агрегатов металлургического комплекса: а — нижнее проектное положение; б — горизонтальное с односторонним раскрытием

использовать при выполнении сварки различных видов соединений в разных пространственных положениях при разных условиях выполнения работ. При этом должны были быть обеспечены необходимые показатели прочности и вязкопластичные свойства металла сварных соединений, а также высокие показатели производительности сварки.

Исследование трещиностойкости сварных соединений расчетными методами с учетом класса сталей, типа проволоки и условий сварки. Поскольку образование и развитие трещин, инициированных водородом, в основном определяется классом свариваемой стали, типом сварочного материала, режимом сварки, формой и геометрическими размерами соединения, то для прогнозирования водородного охрупчивания сварного соединения в качестве базисных приняты следующие четыре условия, при наложении которых вероятность зарождения и развития водородных трещин возрастает:

наличие напряженного состояния растяжения в зоне сварного соединения, возникающего в результате термического цикла сварки и определяемого характером соединения сварных деталей, их толщиной, а также наложением внешних напряжений;

максимальный уровень содержания водорода в металле шва, который адсорбируется в процессе сварки сварочной ванной из атмосферы дуги и способен диффундировать в металл ЗТВ (определяется содержанием остаточной влаги в сердечнике порошковой проволоки, наличием загрязнений или волоочильного смазочного масла и других термонестабильных соединений водорода на поверхности проволоки или свариваемого металла);

образование микроструктуры в металле ЗТВ или сварном шве, чувствительной к зарождению и распространению инициированных водородом трещин (определяется главным образом химическим составом основного металла и металла шва, а также термомеханическим циклом сварки);

собственно термический цикл сварки, т. е. промежуток времени, достаточный для диффузии водорода из критических зон сварного соединения (металла ЗТВ или шва) при охлаждении до температуры, при которой резко возрастает риск водородного охрупчивания (определяется режимом сварки, температурой подогрева, формой соединения и толщиной свариваемого металла) [1–3].

При использовании сварочного материала с повышенным содержанием легирующих элементов возрастает вероятность образования трещин в самом сварном шве.

Существуют три основных подхода к предупреждению образования водородных трещин. Во-первых, замедление охлаждения в интервале температур мартенситного преобразования, т. е. уве-

личение продолжительности времени, необходимого для диффузии водорода из металла шва и ЗТВ, уменьшение твердости последнего и соответственно снижение чувствительности микроструктуры к образованию трещин. На практике этот подход реализуется путем местного подогрева или сварки при увеличенной погонной энергии сварки. Во-вторых, уменьшение твердости наплавленного металла (вероятность зарождения трещин в более пластических микроструктурах ниже) путем использования основного металла или сварочного материала, которые обеспечивают более низкий углеродный эквивалент наплавленного металла. В-третьих, уменьшение количества водорода, который вносится в металл шва, поскольку его низкие уровни снижают риск образования трещин. На практике этот подход реализуется с помощью использования технологических процессов, которые контролируют уровень внесенного водорода, или путем применения низководородного сварочного материала, просушивание или прожаривание сварочных материалов и флюсов перед сваркой [2].

Оценку вероятности водородного охрупчивания при сварке порошковой проволокой соединений из металла разной толщины при разных значениях погонной энергии сварки проводили с помощью компьютерной программы PREHE-AT. В программе вероятность образования микроструктур, чувствительных к зарождению и распространению индуцированных водородом холодных трещин, прогнозируется показателем водородного охрупчивания — углеродным эквивалентом (CE или P_{CM}) металла.

Для оценки чувствительности сталей к холодным трещинам использовали следующие выражения [4, 5]:

1) формулу, принятую Международным институтом сварки, для углеродистых сталей, содержащих более 0,18 мас. % углерода или в случаях, когда возможно медленное охлаждение (время охлаждения от 800 до 500 °С составляет более 12 с):

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}; \quad (1)$$

2) формулу для P_{CM} , предложенную Й. Ито и К. Бессо:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

или для CE_{MW} (Дюрэн):

$$CE_{MW} = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn + Cu}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) применяли для сталей, содержащих менее 0,22 мас. % углерода, и в случаях



Таблица 1. Химический состав металла, мас. %, наплавленного самозащитной порошковой проволокой

Марка проволоки	C(max)	Si	Mn	Ni	Al	Ti	Zr	S(max)	P(max)
ПП-АН60	0,15	0,1...0,15	1,1...1,3	0,9...1,0	0,65...0,75	—	0,01...0,015	0,005	0,01
ПП-АН62	0,15	0,05...0,10	1,0...1,3	—	0,2...0,3	0,05...0,10	—	0,01	0,025
ПП-АН7	0,15	0,3...0,4	0,9...1,2	—	—	—	—	0,03	0,03

быстрого охлаждения (время охлаждения от 800 до 500 °С) менее 6 с;

3) формулу Т. Юриоки:

$$CEN = C + A(C) \times \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right), \quad (4)$$

где $A(C) = 0,75 + 0,25 \tanh \{20(C - 0,12)\}$, для оценки сталей, содержащих до 0,25 мас. % углерода.

Формула (4) легко превращается в выражение, подобное для $CE_{ПВ}$, P_{CM} или $CE_{МВ}$ для сталей с повышенным содержанием углерода, так как в зависимости от содержания последнего изменяется корректирующий множитель $A(C)$;

4) для учета влияния кислорода на микроструктуру можно использовать формулу Д. Л. Олсона:

$$P_{CM}^O + C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{V}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + 5B - \frac{3}{4}O. \quad (5)$$

Она используется при оценке углеродного эквивалента металла сварного шва.

Интерпретировать полученные результаты можно с помощью следующих параметров: минимальной температуры свариваемого соединения; погонной энергии сварки; максимального углеродного эквивалента основного металла; допустимого уровня содержания диффузионного водорода.

Основываясь на экспериментальных данных по основным параметрам сварочного процесса, типу соединения, основного металла и его толщины, определяется значение одной из четырех характеристик. Таким образом, могут быть быстро оценены безопасные комбинации температуры подогрева, погонной энергии сварки, углеродного эквивалента основного металла (металла шва) и допустимый уровень диффузионного водорода, при которых образование водородных трещин в металле ЗТВ или шве маловероятно.

На рис. 2 приведены диаграммы безопасных уровней погонной энергии Q при сварке стыковых соединений разной суммарной толщины свариваемых пластин CT . На диаграммы нанесены области, отвечающие типичному химическому составу металла шва и уровням содержания в нем диффузионного водорода, для ряда самозащитных порошковых проволок, указанных в табл. 1.

Когда выбор основного металла или сварочного процесса ограничивается металлургическими или экономическими требованиями, а также техническими и технологическими возможностями используемого оборудования, риск образования водородных трещин может быть уменьшен путем продления времени, необходимого водороду для диффузии из зоны сварного соединения во время охлаждения к температуре, которая является опасной с точки зрения повышенного риска образования индуцированных водородом трещин. На практике эта задача решается путем выбора со-

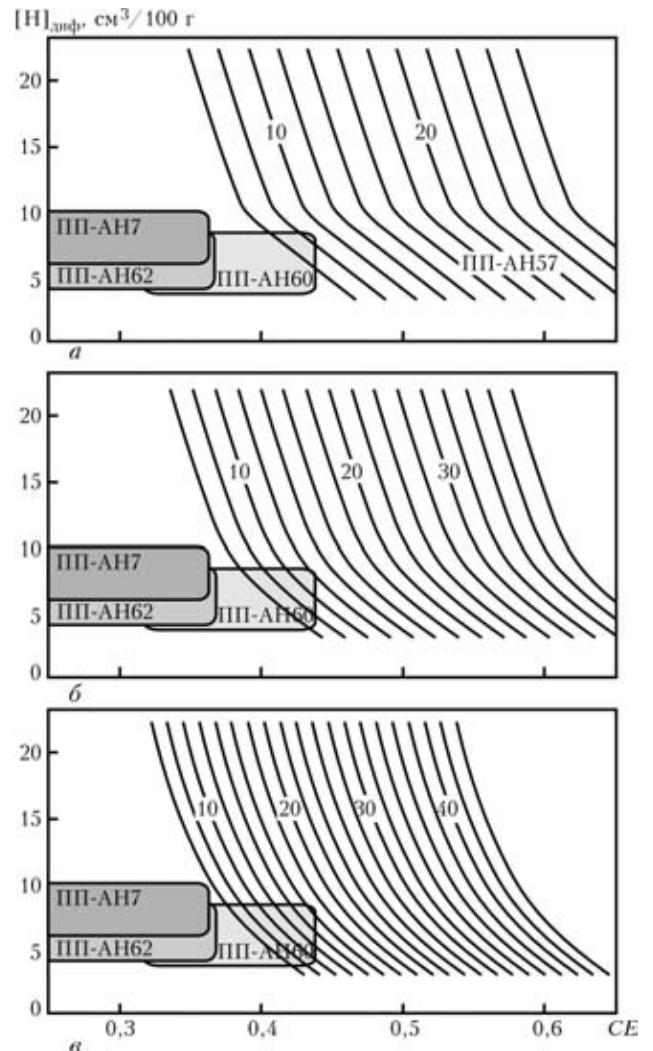


Рис. 2. Диаграммы безопасных уровней погонной энергии Q в зависимости от углеродного эквивалента металла (кривые) при сварке стыковых соединений разной суммарной толщины: а — $CT = 33$; б — 44; в — 60 мм

Таблица 2. Минимальные температуры подогрева (°С) при различной погонной энергии сварки и химическом составе металла для стыковых соединений

Q , кДж/мм	Основной металл—сталь 09Г2С суммарной толщины, мм			Основной металл—сталь 10ХСНД суммарной толщины, мм			Металл шва суммарной толщины, мм		
	24	40	120...160	24	40	120...160	24	40	120...160
0,7	40	112	149	83	128	167	65	121	159
0,8	0	102	146	51	119	163	27	110	155
0,9	–	86	143	17	109	159	0	100	150
1,0	–	65	139	0	98	155	–	84	147
1,1	–	39	136	–	83	151	–	64	144
1,2	–	15	133	–	63	148	–	39	141
1,3	–	0	129	–	39	145	–	16	137
1,4	–	–	126	–	17	142	–	0	134
1,5	–	–	122	–	0	139	–	–	131
1,6	–	–	119	–	–	136	–	–	128
1,7	–	–	115	–	–	133	–	–	125
1,8	–	–	112	–	–	129	–	–	121
1,9	–	–	108	–	–	126	–	–	118
2,0	–	–	105	–	–	123	–	–	114
2,2	–	–	101	–	–	120	–	–	111
2,5	–	–	92	–	–	115	–	–	106

ответствующих режимов сварки, которые обеспечивают более высокое вложение тепла, или применяют технологические процессы сварки с местным подогревом. Эти действия отдельно или совместно замедляют скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения в сварном шве и металле ЗТВ. Кроме того, при использовании этих методов микроструктура во многих случаях более благоприятная, а поэтому менее чувствительная к образованию трещин.

Наиболее эффективным методом предупреждения образования холодных трещин является снижение количества водорода, которое может попасть в зону сварки. На практике это означает применение низководородных сварочных процессов, таких, например, как сварка неплавящимся электродом или в инертных газах с очищением места сварки. Использование сварки порошковой проволокой может привести к насыщению водородом в довольно больших количествах. Обоснованный выбор состава проволоки и применение ее термообработки перед сваркой позволяет обеспечить необходимый низкий уровень содержания диффузионного водорода в металле шва.

Расчетными методами проанализированы стыковые соединения низколегированных сталей, сваренные порошковой проволокой. В качестве основного металла рассматривали такие стали, как 10ХСНД, 09Г2С. Расчеты выполнены для стыковых соединений с толщиной основного металла 12...80 мм. В качестве сварочного материала рассматривали экспериментальный вариант самоза-

щитной порошковой проволокой типа ПП-АН60 для сварки. Диаметр проволоки 1,6 мм, режим сварки: $U_d = 24...28$ В; $I_{св} = 200...300$ А; $v_{св} = 20...40$ см/мин; $Q = 7,2...25,2$ кДж/см. Содержание диффузионного водорода не более $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

Углеродный эквивалент стали 10ХСНД: $CE_{о.м1} = 0,38...0,46$ ($CE_{о.м1}^{ср} = 0,43$); стали 09Г2С: $CE_{о.м2} = 0,32...0,44$ ($CE_{о.м2}^{ср} = 0,38$). Углеродный эквивалент наплавленного металла: $CE_{н.м} = 0,33...0,45$ ($CE_{н.м}^{ср} = 0,39$). Суммарная толщина соединения $CT = 24; 40; 120; 160$ мм.

Результаты расчетных исследований приведены в табл. 2. Местный подогрев следует применять непосредственно перед сваркой. Температура основного металла должна достигать минимально рекомендованной температуры подогрева на расстоянии не менее 75 мм с обеих сторон от соединения. Температуру следует измерять на обратной стороне от приложенного источника нагрева свариваемых пластин. При ограниченном доступе к изделию необходимо дать возможность выровняться температуре по сечению основного металла (около 2 мин на каждые 25 мм толщины).

Исследования и разработка образцов самозащитной порошковой проволоки для ремонтной сварки металлургического оборудования. Для ремонтной сварки металлургического оборудования в Институте электросварки им. Е. О. Патона создана самозащитная порошковая проволока марок ПП-АН60 и ПП-АН62 диаметром 1,6 мм,



Таблица 3. Основные характеристики самозащитных порошковых проволок

Марка проволоки	Тип стандарта		Шлаковая основа	Полярность сварочного тока
	ГОСТ 26271	EN758		
ПП-АН60	ПС49-А3У	T 50 3 1Ni YN 1 H10	CaO–MgO–Al ₂ O ₃ –R ₂ O–BaF ₂ –LiF	Прямая
ПП-АН62	ПС44-А2У	T 46 2 SN 1 H10	MgO–R ₂ O–MnO _x –FeO–Al ₂ O ₃	Обратная
ПП-АН7	ПС44-А2Г	T 42 2 VN 3 H10	CaO–TiO ₂ –SiO ₂ –Na ₂ O–CaF ₂ –NaF	»

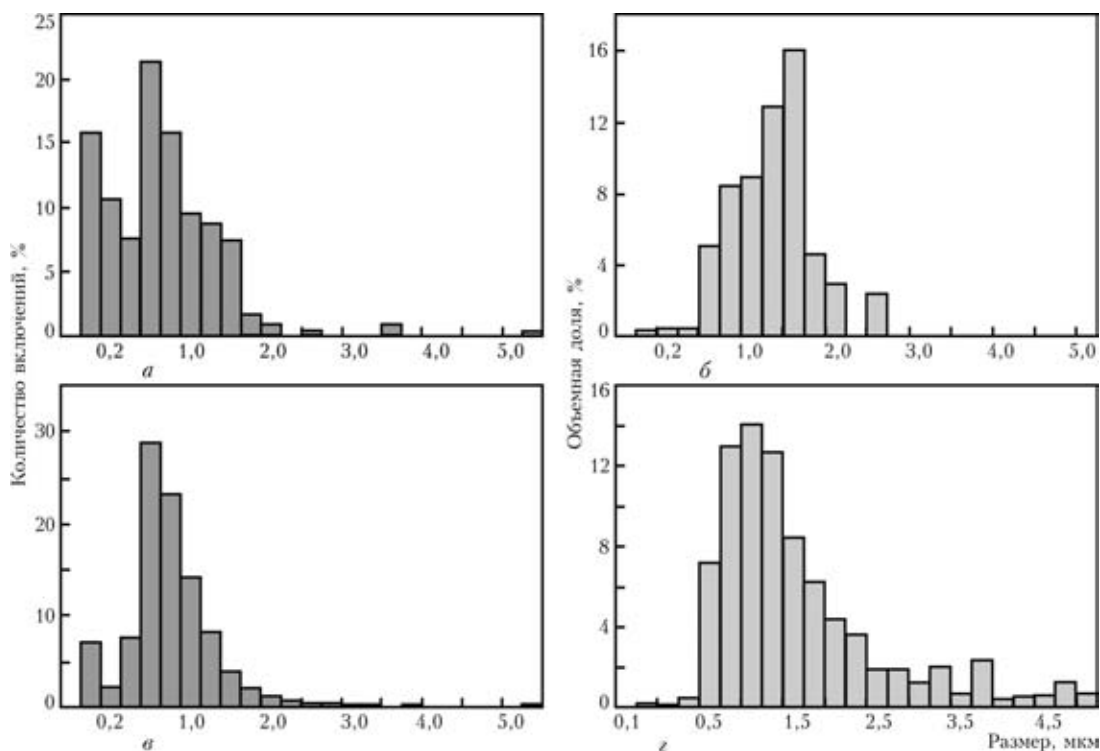


Рис. 3. Распределение неметаллических включений по размеру при сварке порошковыми проволоками фторидного (а, б) и оксидного (в, z) типов

предназначенная для сварки во всех пространственных положениях конструкций из углеродистых и низколегированных сталей [6–8], а также самозащитная порошковая проволока двухслойной конструкции ПП-АН7 диаметром 2,0 мм для сварки на горизонтальной плоскости. В табл. 3 приведены основные характеристики проволоки.

При сварке проволоками ПП-АН60 и ПП-АН62 стойкость металла шва против образования пор, вызванных азотом, достигается путем легирования металла шва алюминием, который вводится в виде порошка в сердечник самозащитной порошковой проволоки. Порошковая проволока ПП-АН60 имеет сердечник оксидно-фторидного типа с высокой основностью шлаков, ПП-АН62 — оксидного типа с низкой основностью. Обе проволоки при сварке образуют шлаки, которые быстро твердеют.

Результаты металлографических исследований распределения и состава неметаллических включений в металле швов, выполненных проволоками фторидного и оксидного типов, представлены на рис. 3. Для металла швов, выполненных проволокой фторидного типа ПП-АН60, характерно от-

носительно равномерное распределение дисперсных частиц неметаллических включений, которые представляют собой преимущественно нитриды и оксиды алюминия. Неметаллические включения в металле шва, выполненного самозащитной проволокой оксидного типа ПП-АН62, представляют собой преимущественно оксиды алюминия, и только небольшая часть (менее 5 об. %) — оксиды кремния и марганца. Объемная часть неметаллических включений в швах, полученных при сварке проволокой ПП-АН60 (фторидный тип), составляет в среднем 0,3, а в швах, полученных при сварке проволокой ПП-АН62 (оксидный тип), — 0,85 %.

Металл, наплавленный проволокой ПП-АН60, имеет низкое содержание серы (0,003...0,008 мас. %), что значительно меньше, чем в металле швов, сваренных проволоками общего назначения (~ 0,015...0,025 мас. %). Это объясняется использованием в сердечнике активных десульфураторов.

Типичные механические свойства металла швов и сварных соединений, выполненных самозащитными порошковыми проволоками трех типов — фторидного (ПП-АН60), оксидного (ПП-

Таблица 4. Механические свойства сварных соединений, выполненных порошковыми проволоками

Марка проволоки	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Температура, при которой ударная вязкость KCV не менее 35 Дж/см ² , °С
ПП-АН60	580...620	490	22	-30
ПП-АН62	550...580	490	22	-20
ПП-АН7	500...650	440	20	-20

Примечание. Режимы сварки: $I_{св} = 250...270$ А, $U_d = 21...22$ В; ПП-АН60 — прямая, ПП-АН62 и ПП-АН7 — обратная полярность.



Рис. 4. Общий вид монтажа воздухонагревателя

АН62) и карбонатно-флюоритного (ПП-АН7), приведены в табл. 4. По сварочно-технологическим свойствам проволоки характеризуются хорошей отделяемостью шлаковой корки, благоприятной формой швов, возможностью сварки широкого диапазона толщин свариваемого металла,

позволяют выполнять сварку металлоконструкций в условиях монтажной площадки в разных пространственных положениях.

Испытание порошковой проволоки согласно требованиям ремонтной монтажной сварки в условиях металлургического производства. Программа испытаний порошковых проволок при ремонте и монтажной сварке предварительно была согласована с металлургическими предприятиями ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского» (Днепропетровск), ОАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» (Мариуполь) и производителем монтажно-сварочных работ на комбинате «Азовсталь» ОАО «НДВП Криворожстальконструкция».

Программы включали выбор типичных объектов сварки, предыдущие испытания с определением типов сварочного оборудования (полуавтоматов) для монтажных условий, проведение практикумов для сварщиков по сопровождению в производство технологии сварки самозащитной порошковой проволокой на объектах металлургических предприятий.

Для выполнения программы на ГП «Исследовательский завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона» были изготовлены опытно-промышленные (по отдельным договорам) и промышленные партии самозащитных порошковых проволок трех марок. Предыдущими испытаниями установлено, что требованиям монтажной сварки избранных объектов по показателям производительности



Рис. 5. Ремонтная сварка порошковой проволокой ПП-АН7 металлургического оборудования на Днепропетровском металлургическом комбинате



в наибольшей мере отвечает проволока ПП-АН7 диаметром 2,4 мм.

Главным объектом монтажной сварки на металлургическом комбинате «Азовсталь» было сооружение (реконструкция) воздухонагревателя доменной печи (рис. 4). Основной металл — сталь 09Г2С. Основным объемом сварки порошковой проволокой приходилось на выполнение горизонтальных и вертикальных соединений при монтаже купола. Использовали модернизированные полуавтоматы ПШ-107В. Качество выполненных швов отвечало выдвинутым требованиям. Замечания главным образом касались нестабильной работы полуавтоматов, которые питались от источника сварочного тока. Для ликвидации этого недостатка была изменена схема питания с использованием независимого источника, что обеспечило стабильную работу полуавтоматов. В результате при сварочно-монтажных работах повышается производительность при высоком качестве сварных соединений, выполненных порошковой проволокой.

На Днепровском металлургическом комбинате им. Ф. Э. Дзержинского объектами сварки были определены корпуса конвертеров, кожухи доменных печей, металлоконструкции мостовых кранов, трубопроводы и корпуса ковшей (рис. 5). Наибольший объем сварки на начало работ приходился на ремонтную сварку объектов с выполнением швов в нижнем, горизонтальном и вертикальном положениях (щиты, усиливающие пояса, накладки и др.). При сварке самозащитной порошковой проволокой на открытых площадках, где скорость ветра не превышала 8 м/с, не выявлено никакого заметного влияния ветра на качество сварных швов. Поэтому в регламенты сварки введено разрешение на применение процесса при скорости ветра до 7 м/с, что в несколько раз превышает воз-

можности сварки на монтаже проволокой сплошного сечения.

По результатам опытно-промышленных испытаний приняты решения по расширению объемов использования механизированной сварки самозащитной порошковой проволокой металлоконструкций и оборудования металлургических предприятий. Определены мероприятия по технической и технологической подготовке предприятий для расширения номенклатуры объектов, рекомендованных для внедрения сварки порошковой проволокой. Проведены предварительные экономические расчеты, подтверждающие эффективность внедрения новой технологии при ремонтно-восстановительной сварке в условиях металлургических предприятий.

1. *Гривняк И.* Свариваемость сталей / Пер. со слов. под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
2. *Coe F. R.* Welding steels without hydrogen cracking // The Welding Institute Report. — Abington, 1973. — 68 p.
3. *Devletian J. H., Fichtelberg N. D.* Controlling hydrogen cracking in shipbuilding // Welding J. — 2001. — № 11. — P. 46–52.
4. *De Meester B.* Note on the carbon equivalent // Welding in the World. — 1990. — 28, № 2/4. — P. 48–54.
5. *Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами* / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, В. И. Швачко и др. / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 2004. — 442 с.
6. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Самозащитная порошковая проволока малого диаметра для сварки металлоконструкций из углеродистых и низколегированных сталей в монтажных условиях // Сварщик. — 2004. — № 1. — С. 35.
7. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Самозащитные порошковые проволоки трубчатой конструкции с сердечником на основе соляных систем // Сб. докл. III Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество». — Днепропетровск, 1–4 июня, 2004. — С. 123–131.
8. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Самозащитные порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей // Автомат. сварка. — 2005. — № 4. — С. 31–33.

On the basis of experimental investigations of the technique of welding the metallurgical complex units with a self-shielding flux-cored wire the technological parameters and productivity of welding were determined in case of application of the wire of three types. Expediency of using wire of the double-layer design in welding of metal of medium and large thickness in flat and horizontal positions of welds is shown. It is expedient to use wire of tubular design when making welds in vertical and overhead positions. Welding technology for typical metal structures is developed.

Поступила в редакцию 14.02.2007