

Сварка металлических конструкций с антикоррозионными покрытиями.

77-48211/514304

12, декабрь 2012

Шатов А. П.

УДК 658.512

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

k_mt3@org.bmstu.ru

Объем крупногабаритных металлических сооружений и конструкций в России достигает 800 млн. т /1, 2./. Классификация сварных конструкций приведена в работах /5, 7/. Значительная часть этих сооружений - сварные конструкции, эксплуатирующиеся в условиях воздействия экологических и коррозионно-опасных технологических и природных средах (оболочечные конструкции – нефтегазовые сооружения (трубопроводы и резервуары и т. д), выработала плановый ресурс на 50-70 % в результате коррозии, сопровождающаяся резким старением основного металлофонда, его физическим и моральным износом. Значительная часть сооружений полностью исчерпала плановый ресурс и вступает в период интенсификации отказов.

“Жизненный цикл” конструкции подразделяется на четыре основные стадии (рис. 1): проектирование, изготовление, эксплуатации, реновации (реконструкция, ремонт). Изменение интенсивности отказов на эксплуатационной стадии имеет три характерных периода:

1. приработка, как период отказов, когда выявляются недостатки строительства;
2. нормальная работа при практически постоянной интенсивности отказов по причинам преимущественного случайного характера;
3. возрастание интенсивности отказов.

Значительная часть нефтегазовых сооружений (НГС) вступило в третий период эксплуатации – период интенсификации отказов(рис. 1) в связи с протеканием процессов деградации (охрупчивания) металла . Подробно это рассмотрено в работах /1,2 / . Отмечается, что основными причинами отказов НГС является коррозия, дефекты сварки, материала, брак строительно-монтажных работ, стихийные бедствия, механические повреждения.

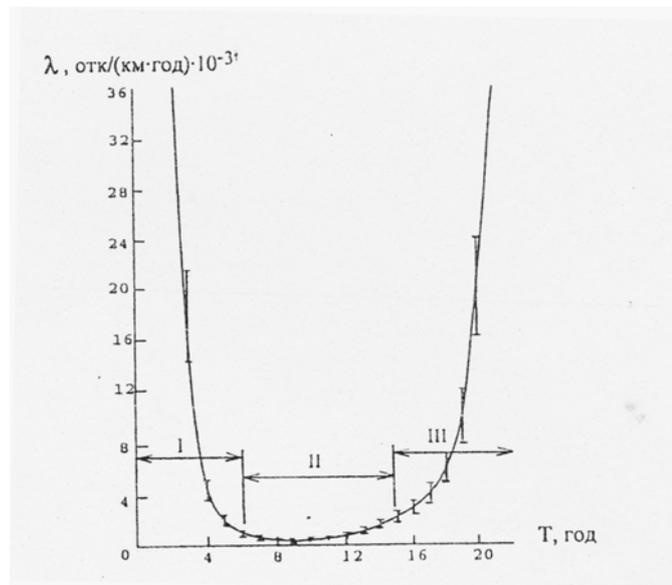


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов магистральных нефтепроводов во (I-III - периоды эксплуатационной стадии жизненного цикла нефтепроводов).

Недавние аварии на НГС делают проблематичным увеличение срока службы таких конструкций и снижение их отказов, приводящих к значительным экономическим потерям и необратимым экологическим последствиям.

Одним из способов увеличения срока службы таких конструкций является применение антикоррозионных покрытий (лакокрасочных, металлических из цинка или алюминия, а также силикатных и т.д.) в соответствии со СНиП 2.03.11-85 и другими нормативными документами. Однако технология сварки таких стальных конструкций до настоящего времени разработана недостаточно/1, 11/.

В работе рассматриваются вопросы, касающиеся технологии сварки плавящимся электродом в углекислом газе, ручной дуговой сварки электродами (физических условий существования дугового разряда, показателей свариваемости, механических условий и коррозионных свойств сварных соединений) стальных конструкций с защитными покрытиями.

Под действием теплоты сварочной дуги при сварке стали с различными антикоррозионными покрытиями в зависимости от физико-химических свойств покрытия (табл.1) происходит их разложение и выгорание. В результате газохроматического анализа различных лакокрасочных покрытий установлено, что они содержат (%): 50-70 водорода, 13-44 оксида углерода, 0,5-6,3 углеводородных соединений, 0,09-0,19 углекислого газа, 2,2 – 2,9 азота, 2,4-2,9 кислорода./11/.

Таблица 1

Покрытие или металл	Плотность при 20 ⁰ С кг/ м ³	Термостойкость ⁰ С	T _{пл.} , ⁰ С	T _{инр.} , ⁰ С	Теплопроводность при 20 ⁰ С Вт/(м К)	ТКЛР при 0-100 ⁰ С, 1 / ⁰ С
Лакокрасочное	1150	85-260	-	-	0,0004	-
Железо	7850	-	1539	2887	78	11 x. 10 ⁻⁶
Алюминий	2700	-	660	2348	204	24.x10 ⁻⁶
Цинк	7100	-	419	906	112	30 x 10 ⁻⁶
Силикатное (в том числе с содержанием бора)	-	115-1000	-	-	0,005	10,6x 10 ⁻⁶

Как известно средняя температура сварочной дуги зависит не только от сварочного тока, но и от эффективного потенциала дуги. Уменьшение последнего снижает среднюю температуру ее столба, что при заданном сварочном токе связано с уменьшением напряженности поля, необходимой для поддержания того же количества заряженных частиц, участвующих в переносе в дуговом промежутке.

Связь между эффективным потенциалом ионизации и средней температурой столба дуги описывается формулой /1, 6, 10/:

$$U_{эф} = T / 810 ,$$

которая имеет приближенный характер, так не учитывает зависимости средней температуры плазмы от плотности тока.

Среднюю температуру столба сварочной дуги при сварке сталей по антикоррозионным покрытиям исследовали методом спектроскопической диагностики с применением методики определения относительной интенсивности нескольких спектральных линий железа с длиной волны 418-440 нм /1, 4/. Для снятия исследуемой дуги использовали сварочную установку ТСГ-7М и поворотный стол, а также спектрограф ИСП-51 (рис. 2). Результаты опытов по исследованию средней температуры столба дуги приведены в табл. 2.

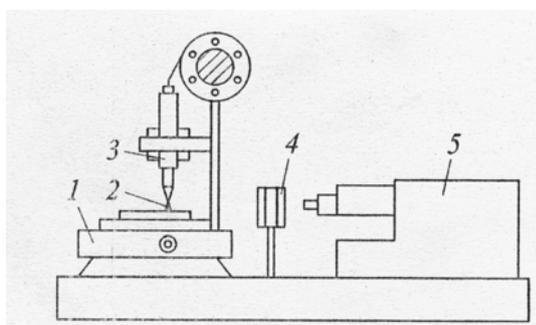


Рис. 2. Установка для измерения средней температуры сварочной дуги: 1 – поворотный сварочный стол, 2 – сварочная дуга, 3 – механизм подачи проволоки в зону сварки, 4 – конденсер, 5 – спектрограф ИСП-51.

Таблица 2

Покрытие	Толщина покрытия, мкм	Средняя температура столба дуги, К	Эффективный потенциал ионизации столба дуги, В
Без покрытия (СтЗсп)	0	5600 \pm 300	6,9
Лакокрасочное ГФ-021	30-32	5900 \pm 300	7,3
	74-32	6220 \pm 300	7,7
ФЛ-03К	20-45	5850 \pm 300	7,2
	120-160	6450 \pm 300	7,9
ХС-059	20-40	5850 \pm 300	7,2
	73-87	6200 \pm 300	7,7
Металлизационное алюминиевое	80-100	5508 \pm 300	6,8
	250-300	5124 \pm 300	6,4
Горячее цинкование Металлизация цинком	50-80	6300 \pm 300	7,8
	100-120	6800 \pm 300	8,4
	250-300	7500 \pm 300	9,2
Боросиликатное	2500-3000	5650 \pm 300	6,9

Для измерения приэлектродных падений напряжения использовали методику определения суммы эффективных значений анодного и катодного падений напряжения с последующим разделением по тепловому балансу [10]. Исследования проводили при сварке в углекислом газе с применением электродной проволоки Св-08Г2с диаметром 1,2 мм с постоянной скоростью ее подачи при наплавке на стальные пластины (СтЗсп) размером 200x50x6 мм, на поверхность которых перед сваркой предварительно наносили различные антикоррозионные покрытия. Режим сварки: $I_{св} = 120-140$ а, $U_{д} = 22-23$ в, $v_{св} = 15$ м/ч, $g_{CO_2} = 900$ л/ч, ток постоянный обратной полярности. Одновременно осциллографировали параметры режима по току и напряжению (осциллограф МПО-02). Результаты исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

Покрытие	Толщина покрытия, мкм.	Приэлектродные U_a	падения U_k	напряжения, В $U_a + U_k$
Без покрытия(СтЗсп)	0	2,9	14,1	17,0 \pm 0,5
Лакокрасочные	25-45	3,0	15,0	18 \pm 0,5
	70-120	3,1	15,4	18,5 \pm 0,5
Металлизационное алюминиевое	120-140	2,9	14,7	17,6 \pm 0,5
	250-300	2,8	14,5	17,3 \pm 0,5
Горячее цинкование	50-80	2,9	15,1	18,0 \pm 0,5
Силикатное (в том числе с содержанием бора	2000-3000	2,9	14,2	17,1 \pm 0,5

Для качественной оценки остаточных явлений, происходящих в дуговом промежутке, проводили исследования по методике работы /1, 4/. Установлено, что защитное покрытие особенно интенсивно снижает во времени остаточную проводимость после выключения тока и приложений напряжения холостого хода источника питания к электродам. Так, например, при толщине цинкового покрытия 50-80 мкм(горячее цинкование) остаточная проводимость при истечении $0,4 \times 10^{-3}$ с снижается в 2 раза по сравнению с остаточной проводимостью, полученной за тот же промежуток времени при сварке без покрытия(до $1,64 \times 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$ при сварке стали с цинковым покрытием, что затрудняет применение переменного тока в данном случае.

Воздействие среды на характеристики дуги зависит от теплообмена между столбом дуги и окружающей средой, а интенсивность теплообмена – от физических свойств среды. С увеличением тепловых потерь при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне (автомат АДСВ), например, стальных пластин с цинковым покрытием различной толщины, возрастает потенциал столба дуги, а также противоэДС, определяемых по методике /1, 10/ (рис. 3).

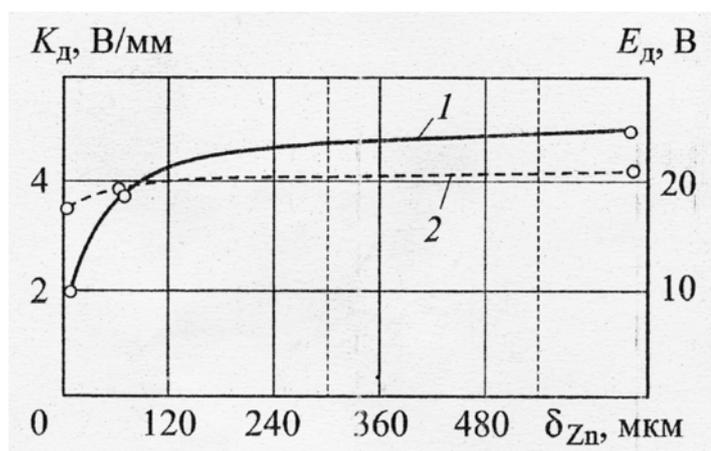


Рис. 3. Изменение градиента потенциала K_d (1) и противоэдс E_d (2) столба дуги при сварке стали по цинковому покрытию неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне (толщина покрытия δ_{Zn}).

Теоретический расчет теплопроводности цинковых паров при температуре сварки 1000 до 6000 К [1, 9] показывает, что с повышением температуры коэффициент теплопроводности этих паров имеет линейно-возрастающую зависимость: при $T = 1000\text{K}$ $\lambda = 0,068$ Вт/(м К), а при $T = 6000$ К $\lambda = 0,330$ Вт/(м К). При этом при сварке стали с цинковым покрытием с ростом толщины антикоррозионного покрытия диаметр столба дуги должен контрагировать (сужаться), о чем косвенно свидетельствует рост приэлектродных падений напряжения, но как показала фотосъемка, диаметр не только не уменьшается с ростом толщины цинкового покрытия, а наоборот возрастает, т.е. сварочная дуга проявляет аномальные свойства.

При разработке и проектировании источника питания для сварки в углекислом газе стальных конструкций с защитными покрытиями, а также для оценки стабильности процесса сварки и рационального выбора параметров режима необходимо знать свойства сварочной дуги как элемента электрической схемы (статические и динамические характеристики дуги, влияние переноса и разбрызгивание электродного металла и т.п.) [3, 6].

Динамические и статические характеристики сварочной дуги исследовали по методике [1, 6]. Качественные изменения инерционности сварочной дуги приведены на рис. 4, 5

Таким образом, большинство лакокрасочных покрытий толщиной < 100 мкм при скорости сварки < 30 м/ч незначительно влияют на динамические свойства дуги (инерционность), однако при толщине > 100 мкм они значительно ухудшают динамические свойства (увеличивается инерционность) дуги, что приводит к повышенному разбрызгиванию электродного металла и нарушению физической устойчивости процесса сварки.

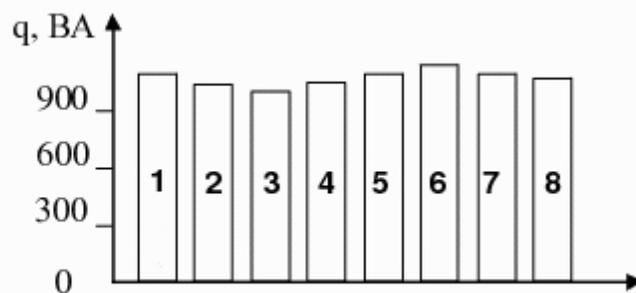


Рис. 4. Среднестатистическая инерционность дуги при различной толщине лакокрасочного покрытия на стали: 1 – без покрытия; 2 – ХС-059; 3 – ФЛ-03К; 4 – ГФ-021; УРФ-1128; 6 –ВЛ-02; 7 – ХС-059 + ХВ-124; 8 – ГФ -021+УРФ -1128 (толщина покрытия составляет 40-60 (2), 29-44 (3), 12-52 (4), 125-196 (5), 150-170 (6), 160-210 (7) и <200 мкм(8).

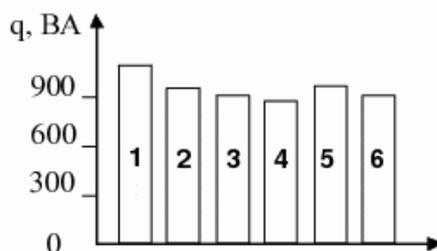


Рис. 5. Среднестатистическая инерционность дуги для металлических покрытий на стали: 1 – без покрытия, 2-4 –цинковое, 5,6 – алюминиевое (толщина покрытия составляет 30-60 (2). 50-80 (3), 80-125 (4), 100-140 (5), 250-300 мкм(6).

Алюминиевые и цинковые защитные покрытия на стали снижают инерционность дуги. Однако при сварки стали можно применять алюминиевые покрытия толщиной <250 мкм и цинкового толщиной <200 мкм. При большей толщине покрытия наблюдается действие мощного потока паров цинка, приводящего к перерывам в протекании тока и нарушению тем самым физической устойчивости процесса сварки. Кроме того, при сварке с алюминиевым металлизационным покрытием с поверхности катода начинает действовать концентрированный плазменный поток. Его возникновение, по-видимому, связано с образованием на поверхности пластины и в головной части ванны участков с низкой работой выхода электронов (для железа работа выхода $\phi=4,36$ В, а потенциал ионизации $U_i=5,95$ В, а для алюминия, соответственно 3,74 В и 5,95 В /1, 7/. По мере выгорания этих участков катодное пятно(обратная полярность) на электроде поворачивается в сторону движения плазменного потока /1, 3, 6/.

Таким образом, при сварке стали с антикоррозионным покрытием, например, лакокрасочным с ростом его толщины границы существования различных областей сварочной дуги смещаются в сторону их сужения (рис. 6).

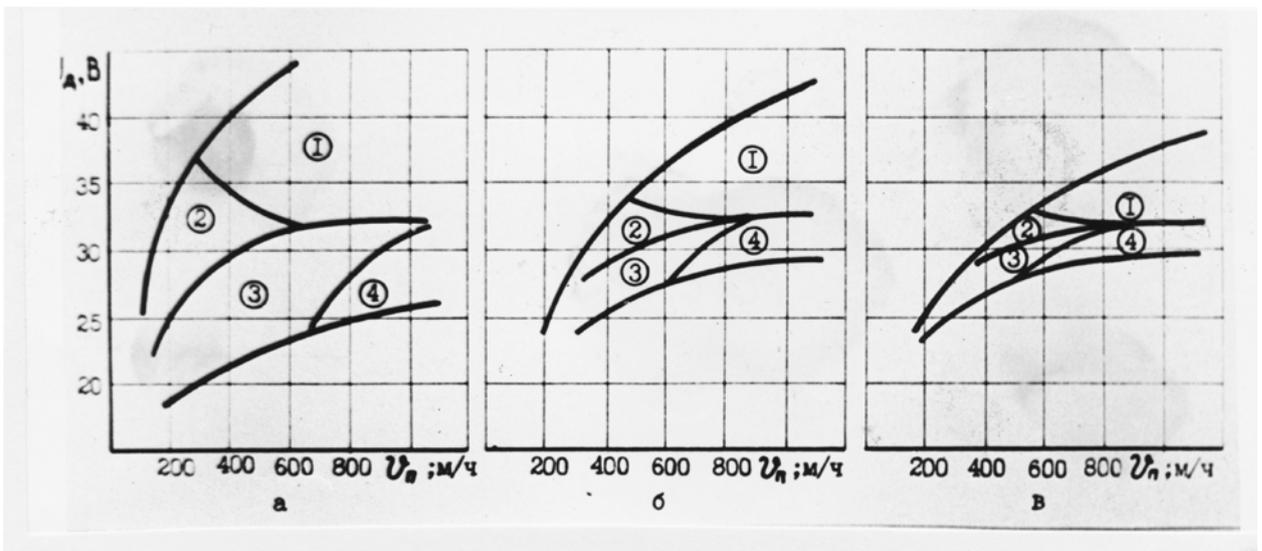


Рис. 6. Области существования разновидностей процесса при сварке по покрытию ГФ-021 толщиной 30-40 (а), 110-120 (б) и 180-210 мкм (в): 1,2 – длинная дуга без коротких замыканий и с редкими короткими замыканиями соответственно; 3 – короткая дуга с частыми короткими замыканиями; 4 – погруженная дуга.

Установлено, что при сварке стали с лакокрасочным покрытием приведенная индуктивная мощность системы питания сварочной дуги должна находиться в диапазоне $(2-3) \cdot 10^{-4}$ Гн. /1/. Указанным условиям удовлетворяют выпускаемые в настоящее время источники питания для сварки в углекислом газе (ВДГ-302, ВДУ-305), а также возможно применение инверторных источников. При этом необходимо применять тонкую стальную электродную проволоку диаметром $< 1,2$ мм и источники питания с жесткой или пологопадающей характеристикой с суммарной индуктивностью питающей системы $(2 - 3) \cdot 10^{-4}$ Гн.

Проплавляющая способность сварочной дуги оценивали по эффективному, термическому и полному кпд дуги /1,9/, относящихся к синергетическим (самоорганизующим) показателям процесса сварки /8/. Установлено, что с увеличением толщины защитных покрытий на образцах из стали СтЗсп размером 100x50x5 мм вышеуказанные коэффициенты снижаются (табл. 4). Это вызвано увеличением потерь теплоты сварочной дуги на плавление и испарение (выгорание) покрытий.

Таблица 4

Покрытие	Толщина покрытия, мкм.	Эффективный кпд дуги	Термический кпд дуги	Полный кпд дуги	Потери сварочной теплоты на испарение, %	$\frac{F_{пр} + F_n}{F_{пр} + F_n}$
Без покрытия	0	0,65	0,27	0,18	-	0,42
Лакокрасочное	18-24	0,60	0,26	0,16	11,1	0,35
	40-75	0,58	0,18	0,11	38,8	0,23
Горячее цинкование и металлизация	50-80	0,53	0,17	0,14	36,4	0,38
	240-300	0,40	0,14	0,06	72,7	0,17
Металлизационное алюминиевое	90-150	0,65	0,19	0,13	35,4	0,36
	240-280	0,60	0,18	0,11	45,0	0,33

Обозначение : F пр – площадь проплавления, F н – площадь наплавленного металла

Результаты исследования пористости при сварке сталей с цинковыми и лакокрасочными покрытиями показали, что в последнем случае образование пор связано с наличием в металле диффузионного водорода, достигающего 9-10 см³ в 100 г Fe (характерный дефект “рыбий глаз”).

При ручной дуговой сварке стали с лакокрасочным покрытием рекомендуется применять постоянный ток обратной полярности, а также электроды с основным или кислым (рутиловым) типом покрытия, связывающим водород в HF и способствующим лучшей дегазации сварочной ванны (при сварке, например, электродами рутилового типа). При сварке стали в углекислом газе плавящимся электродом необходимо проводить корректировку параметров режима сварки (например, по напряжению дуги) с учетом толщины защитного покрытия:

$$\Delta U = N (\delta - 20) + (v_{св} - 20)k$$

где N – коэффициент, равный 0,2-0,3 В/мкм; δ – толщина покрытия равная 20-50 мкм; $v_{св}$ – скорость сварки, равная 20-50 м/ч; k – коэффициент, равный 0,15-0,25 В ч/м. Максимальную толщину лакокрасочного покрытия в этом случае предлагается ограничивать < 50 мкм.

Образование пор при сварке стали с цинковым покрытием (горячее цинкование, металлизация) связано с нарушением газовой защиты (например, при сварке в CO_2 угловых, тавровых и нахлесточных соединений), вызванной мощными цинковыми испарениями со стороны свариваемого изделия и приводящими к проникновению кислорода и азота воздуха в расплавленную сварочную ванну.

Результаты исследования сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин при сварке стали с цинковым и боросиликатным покрытиями показали, что сопротивляемость горячим трещинам металла соответствующих швов снижается. Это связано, соответственно с образованием легкоплавких железоцинковых прослоек по границам зерен и упрочнением бором границ зерен /1/.

При сварке стали с металлизационным алюминиевым покрытием толщиной более > 200 мкм (содержание растворенного алюминия в шве $> 0,24-0,26$ %), а также с боросиликатным покрытием материала труб наблюдается снижение показателей механических свойств металла швов, в частности, порог хладноломкости этих швов смещается с -40 до 0°C по сравнению со швами, полученными при сварке аналогичных стальных образцов без покрытия. Это связано с резким возрастанием содержания неметаллических включений (в 5-6 раз по сравнению со швами, полученными при сварке аналогичных образцов без покрытия) и упрочнением бором границ зерен в швах, полученных при сварке стали с боросиликатным покрытием.

Для предотвращения этих неблагоприятных явлений при сварке с металлизационным покрытием рекомендуется применять, разработанный способ многопроходной сварки опытными электродами, при котором учитывается различное легирующее влияние покрытия, расположенного, например, на свариваемых кромках при V-образной разделке, при выполнении корневых и заполняющих облицовочных слоев этой разделки /11/.

При сварке стальных труб с внутренним покрытием в качестве последнего рекомендуется применять разработанного совместно ОАО "ГИС" стекла с безбористыми силикатными покрытиями, наносимые гранулометрическим способом /1, 11/.

Коррозионная стойкость сварных соединений оцинкованных стальных труб, используемых в системах горячего водоснабжения (до 40°C) и холодного водоснабжения, в 20-25 раз выше коррозионной стойкости аналогичных соединений, полученных при сварке стальных труб без покрытия. Это объясняется действием протекторных защитных свойств цинка, сохранившегося в невыгоревших участках ОШЗ и защищающего оголенные участки шва и околшовной зоны.

Применение силикатных покрытий на внутренней стороне стальных труб, используемых при монтаже сваркой нефтепромысловых трубопроводов нефтекомпрессорных станций позволяет увеличить срок службы таких трубопроводов от 4 до 15 лет и существенно сократить число порывов трубопроводов и связанных с ними затрат на текущий амортизационный ремонт по сравнению с аналогичными стальными трубопроводами без внутреннего покрытия.

Выводы

1. При сварке стальных конструкций с антикоррозионными покрытиями изменяются физические условия существования дугового разряда, а также показатели свариваемости.
2. Рекомендуются верхние допустимые толщины различных антикоррозионных покрытий на свариваемых кромках: лакокрасочного < 50 мкм, цинкового, полученного методом горячего цинкования, < 80 мкм, металлизационного < 200 мкм, металлизационного алюминиевого < 280 мкм, силикатного < 2000-3000 мкм. В случае превышения этих величин целесообразно их уменьшать (механическим, химическим и другими способами) до необходимых.

Список литературы

1. Шатов А.П., Стеклов О.И, Ступников В.П. Сварка и ремонт металлических конструкций с противокоррозионными покрытиями. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 174 с
2. Стеклов О.И. Мониторинг и защита конструкций повышенной опасности в условиях старения и коррозии. // Защита металлов, 1999. Т. 35 № 5, С. 1-5
3. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке. М.: Центр "Академия" 2006, 432 с.
4. Ибатуллин Б.Л., Климова А.В., Михалев В.Г. Влияние активированной электродной проволоки на среднюю температуру столба дуги в углекислом газе. // Сварочное производство, 1970, № 5, С. 11-12.
5. Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Технология изготовления, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1991, 398 с.
6. Ленивкин В.А., Дюргеров, Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989, 264 с.
7. Сварка. Резка. Контроль. Справочник. В 2^х томах / Под ред. Алешина Н.П, Чернышова Г.Г. М.: Машиностроение, 2004, т 1 – 480 с.
8. Зуев И.В. Самоорганизация (синергетика) процессов сварки и пайки. // Сварочное производство, 1995, № 9 С. 13-16
9. Теория сварочных процессов. Учебник для вузов. / Под ред. Неровного В.М. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 752 с
10. Мазель А.Г. Технологические свойства электросварочной дуги. М.: Машиностроение, 1969, 178 с
11. Otto Jurgen Beitrag zur schweissgutbeeinflussungen durch das. Überschweissung vjn Fertigungsbeschichtungen. / Dissertation Dokt. Ing. Abt. Bauingntur Ruhr – Univesitat Bochum. 1978, 142 s.