

УДК 621.791.7.011

К.В. Казак<sup>1</sup>, e-mail: emal56@bk.ru; А.К. Казак<sup>1</sup>, e-mail: emal56@bk.ru<sup>1</sup> ООО «Эмаль-Ставан» (Екатеринбург, Россия).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ СВАРКИ НА КАЧЕСТВО СИЛИКАТНО-ЭМАЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ В ЗОНЕ СВАРНОГО ШВА

Коррозионная надежность трубопроводов различного назначения с защитным силикатно-эмалевым покрытием определяется в первую очередь коррозионной стойкостью внутренней поверхности сварного соединения. В процессе сварки структура металла в зоне термического влияния становится неоднородной, в результате чего изменяются условия взаимодействия металла и покрытия. В процессе выполнения работы по оценке влияния погонной энергии сварки на качество и структуру металла околошовной зоны и металла шва при сварке труб с силикатно-эмалевым покрытием и использованием защитной соединительной втулки была установлена оптимальная скорость проведения сварки (погонная энергия сварки), что позволило получить оптимальный состав металла сварного шва и его силикатно-эмалевого защитного покрытия, а также уменьшить зависимость влияния внешних факторов на качество покрытия в зоне термического влияния. Приведенные в статье результаты исследований показали, что защита металла при сварке с использованием силикатно-эмалевого покрытия и легирование его через покрытие способствуют получению достаточно чистого (без включений) металла сварного шва заданного химического состава при погонной энергии сварки, близкой по величине к 7,0 кДж/см. Существенное уменьшение или увеличение погонной энергии по сравнению с оптимальной приводит к различным видам нарушения покрытия в зоне термического влияния. Металл сварного шва, выполненного под слоем силикатно-эмалевого покрытия с использованием защитной втулки и соблюдением рекомендуемых режимов сварки, имеет однородную структуру, высокую чистоту и постоянство химического состава в зоне термического влияния, что обеспечивает его высокие механические и эксплуатационные свойства. Практические результаты, полученные на действующих трубопроводах нефтегазовой отрасли, исключают возможные ошибочные выводы по итогам лабораторных испытаний.

**Ключевые слова:** сварной шов, силикатно-эмалевое покрытие, зона термического влияния, погонная энергия, шликер, режим сварки, защитная втулка.

Структура металла в зоне нагрева и эмалевого покрытия заданного химического состава формируется и зависит от условий нагрева и охлаждения, влияющих на процессы вторичной кристаллизации, а также на диффузные процессы. Температура, до которой нагрева-

ются отдельные точки околошовной зоны металла и покрытия, изменяется от температуры плавления до температуры окружающей среды. Структура околошовной зоны металла и покрытия зависит от химического состава, теплофизических свойств и термического цикла свар-

ки. Размеры отдельных участков зоны термического влияния и общая ее ширина напрямую зависят от условий нагрева и охлаждения, определяемых погонной энергией сварки, оценка влияния которой на основной металл и покрытие является важной задачей.

Процессы, происходящие при дуговой сварке электродами, характеризуются малыми количествами реагирующих веществ, кратковременностью, высокими температурами и интенсивным взаимодействием между металлом и эмалевым покрытием. В процессе сварки на участке зоны термического влияния в силикатно-эмалевом покрытии происходят физико-химические реакции, которые можно разделить на две группы. К первой относятся процессы, происходящие от начала нагревания зоны сварного соединения до начала оплавления покрытия; ко второй – процессы, происходящие во время оплавления эмалевого покрытия до окончания процесса эмалирования на внутренней поверхности сварного шва. При продолжении нагрева до 500 °С и выше в покрытии образуется множество трещин, увеличивается пористость покрытия и создаются благоприятные условия для свободного доступа кислорода к поверхности металла. При окислении металла образуется оксидный слой за счет диффундирующего извне кислорода. Вторая группа характеризуется протеканием таких важнейших процессов, как интенсивное растворение оксидов железа в расплаве эмали, уменьшение его вязкости с повышением температуры и количества перешедших в расплав катионов железа, а также целого комплекса иных явлений, определяющих в итоге прочность сцепления покрытия со сталью. Несмотря на кратковременность и интенсивность нагрева, влияние данного фактора на качество покрытия является определяющим. Наибольшее разрушение (расплавление) эмали происходит на внутренней поверхности сварного шва, где температура достигает максимальных величин – участок неполного расплавления. Ширина данного участка невелика – 0,5÷2,0 мм, но свойства этого участка оказывают подчас решающее влияние на качество покрытия. На данном

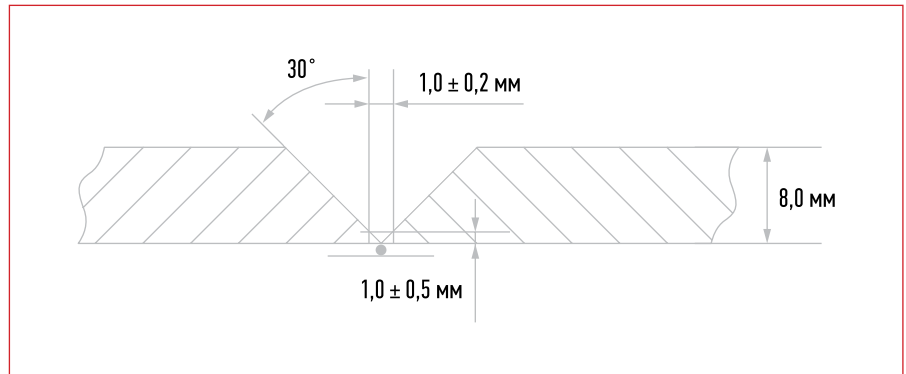
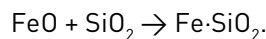


Рис. 1. Чертеж конструктивных элементов подготовки кромок под сварку

Таблица 1. Загрузка мельницы при помоле шликера

Материалы	Количество, вес. ч.
Фритта	100
Часов-ярская глина	4
Молибденовокислый аммоний	0,5
Вода дистиллированная	46

участке наблюдается диффузионное раскисление между основными оксидами (например, FeO и CaO), находящимися в расплавленном шлакометалле шва, и кислыми оксидами (например, SiO<sub>2</sub>), находящимися в расплаве эмали на границе «металл – эмаль». Происходит следующее взаимодействие:



При этом образуется силикат железа (комплексное соединение) в промежуточной зоне «металл – эмаль». Чем выше концентрация кремнезема в эмали, тем интенсивнее протекает диффузионное раскисление.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ, ИМИТИРУЮЩИХ СВАРКУ ТРУБ С ВНУТРЕННИМ ЭМАЛЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАЩИТНОЙ ВТУЛКИ**

В целях определения влияния погонной энергии на качество силикатно-эмалевого покрытия околошовной зоны были проведены лабораторные испытания, имитирующие сварку труб с внутренним

эмалевым покрытием и использованием защитной втулки. С учетом того, что размеры отдельных участков зоны термического влияния и общая ее ширина зависят от условий нагрева и охлаждения, определяемых погонной энергией сварки, толщиной и теплофизическими характеристиками свариваемого металла, толщиной эмалевого покрытия и размерами защитной втулки, а также температурой окружающей среды, состояние защитного покрытия в этой зоне соединения будет зависеть от величины погонной энергии.

Для изготовления образцов использовали трубы из стали марки 20 по ГОСТ 1050–74 диаметром 168 мм с толщиной стенки 8 мм. Конструктивные элементы подготовки кромок под сварку и выполненных швов соответствовали приведенным на рис. 1.

Подготовку внутренней поверхности образцов проводили термомеханическим способом, осуществляя отжиг в силитовой печи при температуре 720 °С в течение 15 мин и абразивоструйную обработку дробеструйным аппаратом (шлакоабразивом) до зеркального блеска поверхности. Нанесение покрытия производили окунанием, шликерным способом. Шликер – водная суспензия, приготовленная в шаровой мельнице из гранулированной эмали (фритты) по ТУ 592400-028.31881402–96 для эмалирования внутренней поверхности труб. Помол шликера вели при следующей загрузке мельницы (табл. 1).

Рабочие параметры шликера:

- тонина помола по Лисенко – 20 ед.;
- консистенция – 4,5 г/дм<sup>2</sup>;
- удельный вес – 1,67 г/см<sup>3</sup>.

После старения шликера (выдержки) в закрытой емкости в течение 24 ч его наносили пульверизатором на предварительно подготовленную внутреннюю поверхность образцов. Далее образцы с покрытием подвергались сушке в сушильной камере при температуре 180 °С в течение 15 мин, затем – обжигу в электрической камерной печи при температуре 910 °С в течение 10 мин. После остывания образцов на воздухе операции нанесения, сушки и обжига повторили, в результате чего получили образцы заготовки из труб с внутренним силикатно-эмалевым покрытием. Толщину слоя эмалевого покрытия измеряли магнитоиндукционным методом прибором «Элекометр» (TGL 18780/06 по DIN 51168). Толщина составила  $(0,45 \div 0,52)^{\pm 0,05}$  мм. Внутреннее покрытие образцов труб – глянцевое, без пузырей, трещин, сквозных пор и других дефектов, обнажающих металл. Для защиты сварного шва использовали соединительную втулку с силикатно-эмалевым покрытием, изготовленную по ТУ-14-2Р-387-2005.

Учитывая, что эмалевое покрытие на образцах имеет толщину значительно меньшую, чем толщина эмали на концах промышленно эмалированных труб, использовали ранее применяемую технологию односторонней сварки эмалированных высоконапорных трубопроводов, разработанную в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина [1]. Перед сваркой на края торцов образцов из труб, покрытых эмалью, нанесли слой шликера толщиной  $1 \div 2$  мм, шириной  $10 \div 12$  мм (рис. 2), затем вставляли соединительную втулку, подсушивали в сушильной камере для увеличения вязкости, а затем выполняли сварку электродом типа Э42А по ГОСТ 9467-75 марки УОНИ-13/45 диаметром 3 мм, предназначенным для углероди-

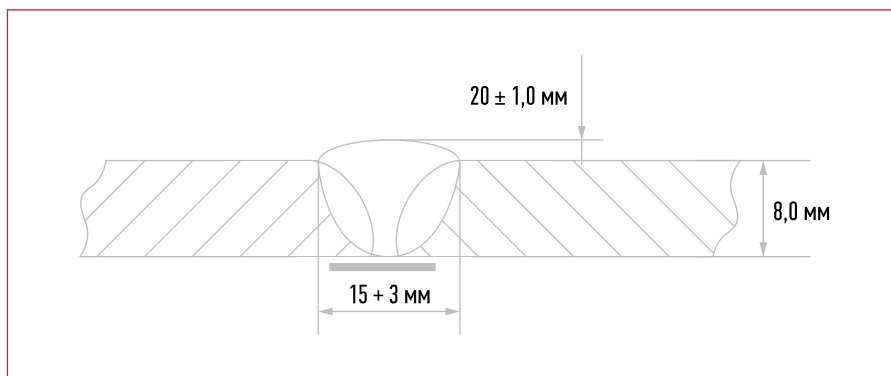


Рис. 2. Чертеж нанесения шликера на края торцов образцов труб

Таблица 2. Погонная энергия при наплавке каждого валика в ходе испытаний

Номер режима	1	2	3	4
Ориентировочное значение погонной энергии, кДж/см	4,7–12,8	16,5–24,3	27,5–36,1	39,8–50,4

стых сталей, с основным покрытием короткой дугой постоянным током обратной полярности («+» на электроде).

Сборку образцов труб проводили с применением наружного центратора собственной конструкции, обеспечивающего установку зазора между трубами 1 мм.

Режим сварки выбрали из условий формирования сварного шва и эмалевого покрытия между внутренней поверхностью трубы и наружной поверхностью втулки (рис. 2). Сначала выполняли сварку корневого шва, а затем последующие три, выполняя перекрытие в «замках» швов в каждом слое  $15 \div 20$  мм. Скорость передвижения дуги старались сохранить постоянной. Погонная энергия при наплавке каждого валика была выбрана в пределах, представленных в табл. 2.

При сварке корневого шва образцов с эмалевым покрытием погонная энергия для каждого образца была выбрана следующая: 1-й образец – 5,0 кДж/см; 2-й образец – 7,0 кДж/см; 3-й образец – 9,0 кДж/см.

Пределы были выбраны на основании анализа материалов, полученных из литературных источников и рекомендаций разработчиков технологии, в том числе проф.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина О.И. Стеклова [1], специалиста Управления Госстроя России А.М. Лошакова [2], а также результатов лабораторных и промышленных испытаний, показавших, что при сварке корневого шва эмалированных труб значения погонной энергии сварки находятся в пределах 7,0 кДж/см. Параметры остальных проходов сварного шва выбирали расчетным способом по методике [3].

Из полученных проб изготавливались образцы для испытания на сплошность покрытия внутренней зоны сварного шва. Проверку проводили осмотром поверхности эмалевого покрытия каждого образца через лупу пятикратного увеличения, фиксируя трещины, поры, прогары, сколы и неметаллические включения. Для определения глубины трещин и прогаров до металла использовали 3%-ный раствор NaCl. В местах дефектов через некоторое время появлялось желтое окрашивание, фиксирующее нарушение сплошности. Применительно к образцам, на которых не были выявлены дефекты покрытия, для выявления нарушения сплошности использовали метод высоковольтной дефектоскопии. Один из полюсов вторичной обмотки повышающего трансформатора

переменного тока подсоединяли к металлу трубной заготовки (образцу), а ко второму полюсу присоединяли проволочную щетку и водили ею по поверхности покрытия. В местах дефектов покрытия появляются искры. Были выявлены и зафиксированы не только явные (трещины, открытые поры), но и скрытые дефекты (закрытые поры, включения).

### ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты подтвердили предположения, что при погонной энергии, близкой к 7,0 кДж/см, обеспечивается качество эмалевого покрытия в зоне термического влияния, которое при увеличении погонной энергии резко снижается. При этом необходимо отметить, что характер дефектов и разрушений силикатно-эмалевых покрытий при увеличении погонной энергии (9,0 кДж/см) и уменьшении (5,0 кДж/см) различный. Так, при увеличении погонной энергии дефекты располагаются на расстоянии  $3 \div 4$  мм в обе стороны от сварного шва (зоны расплава металла), а при уменьшении погонной энергии концентрируются в зоне сварного шва, примыкая к зоне расплава металла. Уменьшение или увеличение погонной энергии по сравнению с оптимальной приводит к нарушению покрытия в зоне термического влияния. Это связано с тем, что меняются скорости и величины охлаждения и параметры структурообразования покрытий. Поэтому для оптимальных свойств покрытия было рекомендовано производить сварку корневого шва при погонной энергии 7,2 кДж/см, а следующие проходы производить с погонной энергией выше 20 кДж/см.

По результатам комплексных исследований, подтвержденных



экспериментальными данными лабораторных и промышленных испытаний, были получены зависимости свойств основного металла и качества силикатно-эмалевого покрытия в зоне стыка сварного соединения от величины погонной энергии. Установлено, что размеры отдельных участков зоны термического влияния и общая ее ширина (а это величина зоны, защищенная соединительной втулкой) зависят от условий нагрева и охлаждения, определяемых погонной энергией сварки, толщиной и теплофизическими характеристиками свариваемого металла и эмалевого покрытия, а также температурой окружающей среды.

Для получения оптимальных свойств металла и силикатно-эмалевого покрытия зоны сварного соединения труб рекомендуется производить сварку за несколько проходов с погонной энергией первого прохода  $\approx 7,0$  кДж/см, а каждый последующий проход – с увеличением погонной энергии в 2–3 раза. Уменьшение или увеличение погонной энергии по сравнению с оптимальной приводит к уменьшению ударной вязкости и угла загиба. Это объясняется тем, что уменьшение погонной энергии при сохранении всех прочих начальных условий приводит к увеличению скорости охлаждения, уменьшению

размеров кристаллизационных зерен и получению менее пластичных структур покрытия, резкому увеличению внутренних напряжений из-за разности коэффициентов термического расширения металла и покрытия, а также коэффициентов теплопроводности и, соответственно, скорости охлаждения. Повышенная погонная энергия приводит к замедленному охлаждению и тем самым к значительному росту кристаллизационных структур, что снижает пластические свойства металла. Использование защитной втулки при соединении эмалированных труб сваркой, проводимой с рекомендуемой погонной энергией, позволяет уменьшить зависимость воздействия внешних факторов на качество силикатно-эмалевого покрытия.

Исследования показали, что защита металла при сварке с использованием силикатно-эмалевого покрытия и легирование его через покрытие способствуют получению достаточно чистого (без включений) металла шва заданного химического состава. Структура металла шва, выполненного под слоем покрытия с использованием защитной втулки, имеет высокую чистоту и однородность химического состава металла шва в зоне термического влияния, что обеспечивает его высокие механические свойства.

### Литература:

1. Гукасов Н.А., Михайловский Ю.Н., Риккер В.И. Теория, практика и перспективы использования труб, покрытых стеклоэмалью. М.: ОАО «ВНИИОЗНГ», 2000. 122 с.
2. Колесцев С.В. Опыт эксплуатации нефтепромысловых труб со стеклоэмальевым покрытием в ОАО «Самаранефтегаз». Пенза, 2002. 45 с.
3. Думов С.И. Технология электрической сварки плавлением. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1987. 461 с.