

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.791.75.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ
ОБРАТНОЙ СТОРОНЫ ШВА НА ВЕСУ ПРИ ОДНОСТОРОННЕЙ
СВАРКЕ КОРНЕВЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ
МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

© 2015 г. А.М. Рыбачук*, Гу Цзэжэнь*, Ю.В. Доронин**, П.С. Кузнецов**

* *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

** *Аттестационный центр городского хозяйства (АЦГХ), Москва*

В работе смоделирован процесс формирования корневого валика шва при односторонней дуговой сварке металлопорошковой проволокой на весу. Показано влияние физико-химических свойств жидкого металла на границе с газовой средой на процесс образования поверхности обратного валика шва. Выполнен расчет силы давления дуги.

Ключевые слова: односторонняя сварка, корень шва, давление дуги, вязкость, межфазное натяжение.

Поступила в редакцию 15.05.2015

Сварка корневого слоя при сборке неповоротных стыков трубопроводов, эксплуатируемых для транспортировки нефти, газа и других продуктов является наиболее трудоемкой задачей при заполнении разделки.

Одним из известных способов формирования шва при сварке на весу является способ сварки в квадрупольном магнитном поле как немагнитных, так и магнитных материалов, позволяющих сваривать стыковые соединения толщиной до 12 мм [1]. Способ позволяет получать шов с близкой к идеальной форме поверхности обратного валика.

При ручной дуговой сварке качественный корневой шов получается при сварке электродами LB-52U за счет уникальной шлаковой системы обмазки и высокого уровня технологии производства электродов. Ответственными за качество валика внутри шлаковой системы являются физические (Тпл. и Ттв.) и физико-химические (вязкость, поверхностное и межфазное натяжение) свойства.

Разумеется, это достигается при известном мастерстве оператора, способном обеспечить высокую технологическую дисциплину по сборке и параметры режима сварки.

В последние десять лет, с учетом возросшей потребности в данной технологии и разнообразия конфигураций трубопроводов ведущими зарубежными компаниями для MIG/MAG сварки разработаны импульсные технологии для выполнения корневого шва. Принципиальные технологические возможности и недостатки данных способов подробно представлены в многочисленных источниках [2, 3].

Данные технологии, однако, характерны «холодной сварочной ванной», что приводит к значительному снижению тепловложения при корневом проходе, что делает невозможным переплавление прихваток, способствует газонасыщению корневого прохода газами и требует выполнения обязательного «горячего» прохода.

Как следствие, в шве невысокие механические свойства и значительное количество дефектов-пор, шлаковых включений, несплавлений в заполняющих проходах.

ЗАО НПФ « ИТС» и ООО «АЦГХ» в работе [2] рассмотрели технологические особенности выполнения корневого прохода трубопровода по принципиально новой технологии с использованием металлопорошковой проволокой POWER BRIDGE 60 М диаметром 1,2 мм.

Авторы пришли к мнению, что эта безшовная, омедненная, металлопорошковая проволока обеспечивает высокую стабильность горения дуги, повышенную вязкость сварочной ванны, благоприятную форму обратного валика как с лицевой, так и с обратной стороны, и самое главное, гарантирует высокие механические свойства (ударную вязкость) при низких температурах.

Тем не менее, гарантируемые и здесь высокие характеристики ударной вязкости и микроструктура корневого слоя определяются не только типом, «но и термическими циклами в зоне от горячего прохода рутиловой порошковой проволокой и заполняющих слоев».

В целом, для потребителей данной технологии не так уж и важно, какой из факторов обеспечивает, безусловно, удовлетворительный результат. Состав ли и конструкция проволоки, условия сборки, параметры режима сварки, пространственные положения при сварке, используемое оборудование (в том числе и источник питания). Хотя внешний вид обратного валика, его геометрические размеры несколько не отличаются от аналогов, полученных, например, при использовании Steel Root (Fronius).

В связи с этим, была сделана попытка проанализировать, в первую очередь, факторы, влияющие на формирование корневого валика. Как известно, все предыдущие исследователи, рассматривая сварочную ванну на весу при MIG/MAG-сварке в состоянии статического или динамического равновесия, исследовали физические и физико-химические свойства металла при температуре выше ликвидуса, параметр сил действующих на жидкий металл со стороны дуги, влияние газовой защитной среды и др.

В отличие от формирования корня шва при односторонней сварке на подкладках, где решающую роль играют свойства расплавленных при взаимодействии с металлом сварочной ванны оксидов подкладного материала, в нашем случае речь пойдет о процессах в корне шва на межфазной границе металл-газ.

На наш взгляд, решающими факторами, которые могут повлиять на геометрические размеры корня шва, ширину, высоту, угол перехода к основному металлу, а также структуру металла шва корневого валика, являются:

- межфазное натяжение на границе расплавленный металл шва – газ с обратной стороны;
- вязкость расплавленного металла при температуре выше ликвидуса;
- величина зазора в стыке;
- угол разделки кромок и величина притупления;
- химический состав и конструкция металлопорошковой проволоки;
- характер переноса металла через дуговой промежуток;
- параметры режима сварки (ток сварки, скорость сварки, напряжение на дуге, диаметр электрода) и, как следствие, все силовые характеристики, как факторы, влияющие на перемещение как электродного, так основного металла по сечению сварочной ванны в продольном и поперечном направлениях;
- электропроводность проволоки в холодном состоянии.

Рассмотрим в данной статье лишь некоторые из них, которые, на наш взгляд, являются наиболее значимыми, а именно – характер переноса металла через дуговой промежуток, физико-химические свойства расплавленного металла при температурах несколько выше ликвидуса, конструкция порошковой проволоки и влияние давления

дуги.

Наиболее полно влияние поверхностных характеристик в сварочных процессах применительно к формированию корня шва освещено в работе [4].

Для проверки влияния физических свойств расплавленного шлака на форму усиления обратного валика к основному металлу и угол перехода, была решена статическая задача, показывающая влияние равновесия сил в сварочной ванне, выражаемое уравнением:

$$P_{\Sigma} = P_{\sigma},$$

где P_{Σ} – сумма объемных и поверхностных сил, действующих в сварочной ванне;
 P_{σ} – сила межфазного натяжения на границе расплава металл-шлак, которая определяется по формуле:

$$P_{\sigma} = \frac{\sigma \frac{d^2 y}{dx^2}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^3}}.$$

После записи уравнения в дифференциальной форме:

$$\frac{\sigma \frac{d^2 y}{dx^2}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^2}} - \rho g \left(\delta_{ж} - \frac{P_d}{\rho g} y\right) = 0. \quad (1.1)$$

далее:

$$\frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^3}} - A(B-y) = 0, \quad (1.2)$$

где:

$$A = \frac{\rho g}{\sigma}; \quad B = \delta_{ж} - \frac{P_d}{\rho g}.$$

После преобразований получаем:

$$\operatorname{tg} \alpha_{п} = \frac{dy}{dx} = \sqrt{-1 - \frac{1}{2C_1}} = \sqrt{-1 - \frac{1}{2AC^2(\sigma) - 4ABC(\sigma) - 1}}. \quad (1.3)$$

где $\delta_{ж}$ – толщина жидкой прослойки металла под дугой;
 ρ – плотность жидкого металла;
 g – ускорение свободного падения;
 P_{σ} – равнодействующая объемных сил.

Это значит, что увеличение межфазного натяжения на границе расплава металл-шлак (в нашем случае на границе металл-газ) приведет к увеличению угла перехода « α » и улучшению эксплуатационных характеристик одностороннего сварного соединения.

Таким образом, межфазное натяжение может служить элементом стабилизации формы обратной стороны шва при односторонней дуговой сварке стыковых соединений. Межфазное натяжение на границе металл-газ по данным С.И. Попеля [5], составляет для углеродистых и низколегированных сталей, например, 30ХГСА

составляет 1450 мДж/м², что превышает более чем в три раза межфазное натяжение на границе шлак-флюс при односторонней сварке на подкладках.

Для разработки схемы течения металла при односторонней сварке очень важно, что наиболее высокие скорости достигаются на передней стенке и в зоне сквозного проплавления. Это утверждение позволяет нам сделать вывод о том, что высокие скорости перемещения металла в корне шва, особенно на режимах с высокими значениями тока сварки, могут привести к значительным затруднениям при формировании обратного валика. В свою очередь, неясно, каково поведение объемных и поверхностных сил на разных стадиях формирования валика в корне шва. Это особенно важно в момент окончательного завершения процесса, когда действуют положения физико-химической гидродинамики.

В этом случае, когда импульс взаимоуравновешивающих друг друга поверхностных и объемных сил исчерпан, окончательная геометрическая форма создается за счет поверхностных сил капли жидкого металла на границе с затвердевающим шлаковым расплавом и описывается формулой:

$$F_r = 2\pi r \Delta \gamma = 2\pi r \sigma_2 (\cos \nu - \cos \nu'), \quad (1.4)$$

где r – радиус периметра смачивания;
 σ – поверхностное натяжение;
 ν, ν' – углы смачивания.

Капиллярное давление или давление Лапласа в любой точке поверхности составляет:

$$P_{\text{л}} = \sigma [(1/R_1) + (1/R_2)], \quad (1.5)$$

где R_1, R_2 – главные радиусы кривизны поверхности в данной точке.

Как следует из уравнения (1.5), капиллярное давление существенно лишь при наличии сильно искривленных поверхностей, но при малой кривизне оно уменьшается, при плоской поверхности обращается в нуль. Если растекание жидкости массой m сопровождается снижением ее центра тяжести на dh , то потенциальная энергия уменьшается на $-dU = -mgdh$ и появляется дополнительная радиальная сила $F_p = -mg(dh/dr)$, вызывающая горизонтальное перемещение жидкости с периметром смачивания [5]. В нашем случае, при формировании обратного валика, гравитационное действие этой силы будет препятствовать растеканию и направлено перпендикулярно действию давления Лапласа (рис. 1).

Одна из наиболее подробно рассмотренных моделей, где рассматривается равновесие сварочной ванны на весу, является математическое описание, выполненное В.М. Березовским [6]. В данной работе определены требования к параметрам стыкового соединения для односторонней сварки на весу. Показано, что угол разделки кромок, зазор и притупление при определенных режимах позволяет добиться плоского обратного валика при сварке неплавящимся электродом.

Авторы [2] утверждают, что формирование корня шва с обратной стороны в значительной степени зависит от вязкости расплава. По данным экспериментальных исследований для расплава промышленных марок стали значения динамической вязкости в интервале температур 1480-1650^oC находятся в пределах 4,5 – 6,0 мПа·с (вязкость чистого железа при перегреве 50 К выше точки плавления составляет 5,4 мПа·с).

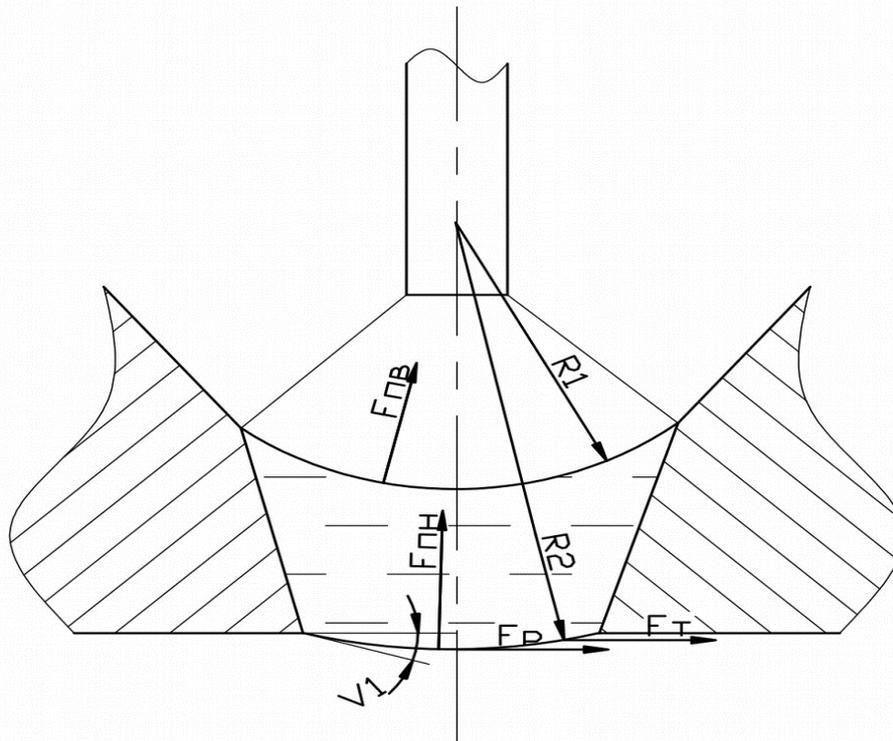


Рис. 1. – Взаимодействие сил при растекании капли на весу:
 $F_{ПН}$, $F_{ПВ}$ – силы поверхностного натяжения на нижнем и верхнем зеркале сварочной ванны;
 F_D , F_T – силы растекания и тянущая сила

Для понимания меры влияния динамической вязкости на создание благоприятной формы обратной стороны шва, классического определения вязкости как свойства жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой, недостаточно. На микроуровне легкость перехода частицы из одного положения в другое связано с величиной энергетического барьера (E_{η}), который приходится преодолевать движущейся частице размером « r » на расстоянии « d » между ее положениями равновесия. С ростом E_{η} , r , d вязкость увеличивается. [7]. Напротив, вязкость уменьшается при повышении температуры из-за увеличения числа частиц, обладающих нужным запасом энергии для осуществления таких переходов. В таком случае величина вязкости или энергия активации вязкого течения E_{η} определяется природой и составом расплава, а также температурой.

$$E_{\eta} = 4\pi r^2 \sigma. \quad (1.6)$$

Данная формула связывает энергию активации вязкого течения и межфазное натяжение на границе металл-газ и показывает влияние этих физико-химических характеристик расплава на состояние металла корня шва при температурах выше ликвидуса.

Это означает, что при достижении определенной энергии активации металл перестает течь в слоях относительно друг друга, межфазное натяжение достигает своих максимальных показателей и начинается процесс кристаллизации.

В процессе отработки технологии сварки и исследования дуги было выяснено, что дуга при сварке металлопорошковой проволокой горит и переносит металл в сварочную ванну по периферии зазора с перераспределением тепла и давления дуги через оболочку проволоки (рис. 2).



Рис. 2. – Фото дуги при сварке порошковой проволокой

Это доказывается результатами исследования зависимости высоты обратного валика шва от тока сварки. При росте тока от 80 А до 180А, высота обратного валика растет незначительно, от 0,5 до 1,6 мм при относительно стабильной ширине обратного валика 6...8 мм (рис. 3). Напряжение на дуге: 21...23 В.

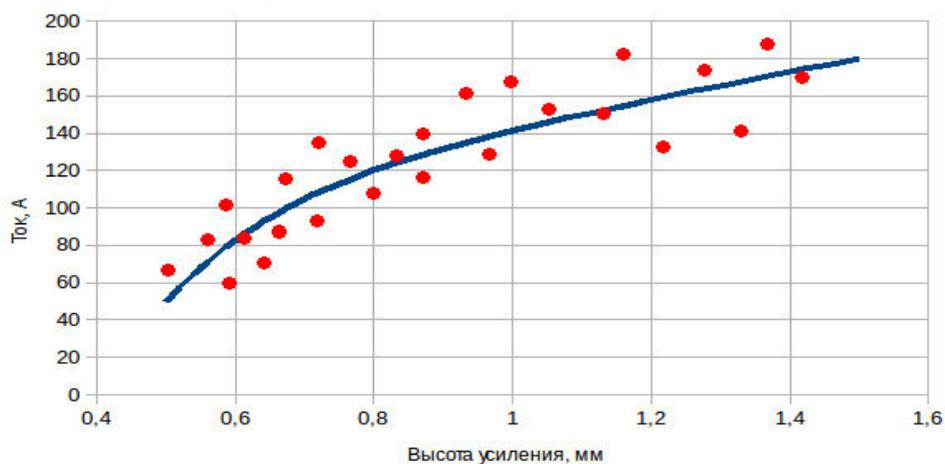


Рис. 3. – Влияние сварочного тока на высоту обратного валика

Внешний вид обратного валика характерен относительно стабильными размерами без подрезов, с пластинками оксидов Mn и Si на поверхности шва (рис. 4).



Рис. 4. – Внешний вид обратного валика шва

В таком случае, важную роль в стабилизации формы шва с обратной стороны при сварке металлпорошковой проволокой на весу, будет играть равнодействующая всех сил, влияющая на расплав металла в корне шва со стороны дуги.

При сварке порошковой проволокой металлическая оболочка проволоки обладает намного большей электропроводностью по сравнению с сердечником [8, 9]. Поэтому активное пятно дуги занимает не всё сечение проволоки, а находится преимущественно на металлической оболочке. Столб дуги с большой скоростью перемещается вокруг сердечника, расплавляя его (рис. 5). При сварке на различных режимах характер горения дуги может быть различным [8]. При сварке на оптимальных режимах дуга, горящая по кольцевой оболочке, обеспечивает мелкокапельный туманообразный перенос электродного металла.

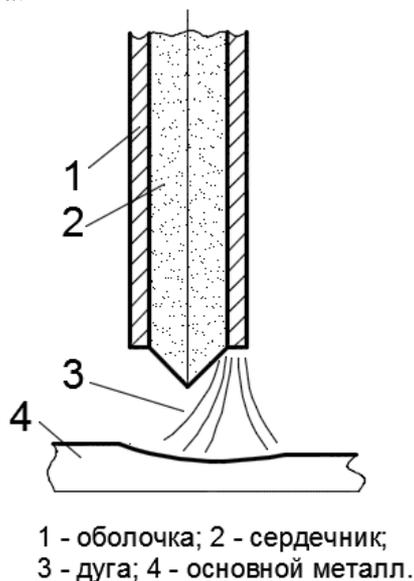


Рис. 5. – Схема горения дуги при сварке порошковой проволокой

Для описания давления такой дуги предложена следующая расчётная схема конусообразной дуги, горящей с кольцевого электрода (рис. 6). Процессы, протекающие внутри кольцеобразно расширяющейся дуги в данной схеме, не учитываются. Полное давление дуги определяется несколькими составляющими [10]. Составляющую давления дуги, связанную с расширением столба, можно определить следующим образом.

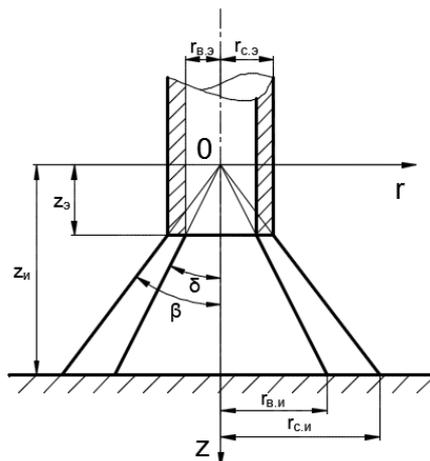


Рис. 6. – Схема дуги при сварке порошковой проволокой

Рассмотрим элементарный кольцевой слой на произвольном расстоянии по высоте. Величина элементарного объёма в этом слое на произвольном расстоянии от оси дуги равна:

$$dv = rd\varphi dz dr \tag{1.7}$$

Собственная осевая электромагнитная сила от взаимодействия радиальной составляющей сварочного тока с индукцией собственного магнитного поля в этом объеме, действующая на этот объем вниз, запишется в следующем виде:

$$df_z = (\overline{j_r} \times \overline{B}) dv = \mu j_r H dv \quad (1.8)$$

С учётом того, что $\frac{j_r}{j_z} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{z}$ и $j_r = j_z \operatorname{tg} \alpha = j_z \frac{r}{z}$ сила, действующая на элементарный объём равна:

$$df_z = \mu j_r H dv = \mu j_z H \frac{r}{z} dv = \mu j_z H \frac{r^2}{z} d\varphi dz dr \quad (1.9)$$

Сила, действующая на элементарное кольцо, равна:

$$dF_k = \int_0^\varphi df_z = \int_0^{2\pi} \mu j_z H \frac{r^2}{z} dz dr d\varphi = 2\pi \mu j_z H \frac{r^2}{z} dz dr \quad (1.10)$$

Примем распределение вертикальной составляющей сварочного тока по поперечному сечению кольца дуги постоянным, тогда:

$$j_z = \frac{I_d}{F_{\text{слоя}}(z)}$$

где $F_{\text{слоя}}(z) = \pi r_c^2(z) - \pi r_b^2(z)$.

Напряжённость магнитного поля на внутренней поверхности столба дуги равна нулю, полагая, что часть столба дуги, занятая шихтой, не электропроводна.

На наружной поверхности столба дуги напряжённость магнитного поля равна [11]:

$$H_c = \frac{I_d}{2\pi r_c} \quad (1.11)$$

Примем величину напряженности магнитного поля по сечению столба постоянной, равной средней:

$$H = \frac{H_c}{2} = \frac{I_d}{4\pi r_c} \quad (1.12)$$

Определим силу, действующую на элементарное кольцо:

$$dF_k = 2\pi \mu j_z H \frac{r^2}{z} dz dr = 2\pi \mu \frac{I_d}{\pi r_c^2 - \pi r_b^2} \frac{I_d}{4\pi r_c} \frac{r^2}{z} dz dr = \frac{\mu I_d^2 r^2}{2\pi r_c (r_c^2 - r_b^2) z} dz dr \quad (1.13)$$

Сила, действующая на элементарный слой:

$$dF_c = \int_{r_b}^{r_c} dF_k = \int_{r_b}^{r_c} \frac{\mu I_d^2 r^2}{2\pi r_c (r_c^2 - r_b^2) z} dz dr = \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3) dz}{6\pi r_c (r_c^2 - r_b^2) z} \quad (1.14)$$

Электромагнитная сила, вызванная расширением столба дуги

$$F_z = \int_{z_3}^{z_n} dF_c = \int_{z_3}^{z_n} \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3) dz}{6\pi r_c (r_c^2 - r_b^2) z} = \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3)}{6\pi r_c (r_c^2 - r_b^2)} \ln \frac{z_n}{z_3} \quad (1.15)$$

Среднее давление, действующее на кольцевую поверхность контакта дуги с жидким металлом:

$$P_d = \frac{F_z}{S_d} = \frac{\mu I_d^2 (r_c^3 - r_b^3)}{6\pi S_d r_c (r_c^2 - r_b^2)} \ln \frac{z_n}{z_3} \quad (1.16)$$

Оно пропорционально квадрату сварочного тока и обратно пропорционально расширению столба дуги. Изменяя параметрами режима сварки конусность дуги, можно регулировать силовое воздействие дуги на сварочную ванну при заданном сварочном токе.

Отработка технологии односторонней сварки неповоротных стыков

трубопроводов производилась в автоматическом режиме в различных пространственных положениях с учетом визуального контроля не только обратной, но и лицевой стороны шва (рис.7).



Рис. 7. – Облицовочный валик шва трубы 530x8мм

ВЫВОДЫ

– При односторонней дуговой сварке металлопорошковой проволокой неповоротных стыков трубопроводов на весу формирование обратной стороны шва определяется давлением дуги и физико-химическими свойствами жидкого металла корневого валика.

– Характер переноса электродного металла способствует распределению давления дуги через оболочку порошковой проволоки и улучшает качество формы корневого шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов, А.И. и др. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем [Текст] / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1972. – №2. – С. 3–6.
2. Карасев, М.В. и др. Технологические особенности выполнения различных слоев шва при автоматической сварке трубопроводов [Текст] / М.В. Карасев, Ф.Е. Дорошенко, А.А. Казаков, Д.А. Любочко // Сварка и диагностика. – 2014. – №6 – С. 45–49.
3. Алешин, Н.П. и др. Актуальные вопросы сварки неповоротных стыков трубопроводов в монтажных условиях [Текст] / Н.П. Алешин, Э.А. Гладков, Ю.В. Доронин, В.Н. Бродягин, П.С. Кузнецов, М.А. Шолохов // Сварка и диагностика. – 2013. – №3. – С. 36–41.
4. Доронин, Ю.В. Разработка теоретических основ формирования обратной стороны шва с учетом физико-химических процессов в сварочной ванне и создание новых сварочных материалов для односторонней дуговой сварки сталей плавящимся электродом [Текст] / Ю.В. Доронин : дисс. докт. техн. наук. – М., 2010. – 352 с.
5. Попель, С.И. Поверхностные явления в расплавах [Текст] / С.И. Попель – М: Metallurgy, 1994. – 432 с.
6. Березовский, В.М. Оптимизация формы шва при непрерывном проплавлении без подкладки [Текст] / В.М. Березовский // Сварочное производство. – 1988. – №3. – С. 29–31.
7. Vockris J.O'M. Investigation into structure of liquid silicates. Rev. Chemical. – 1955. – №1. – p. 234–237.
8. Походня, И.К. и др. Сварка порошковой проволокой [Текст] / И.К. Походня, А.М. Суптель, В.Н. Шлепаков. – Киев: Наукова думка, 1972. – 224 с.
9. Чигарев, В.В. Влияние шихты сердечника на электросопротивление порошковой ленты [Текст] / В.В. Чигарев // Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров: тез. докл. Междунар. науч.-методической конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2001. – С. 16–17.
10. Рыбачук, А.М. и др. Силовое воздействие конусной дуги на электрод и сварочную ванну [Текст] / А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов // Сварка и диагностика. – 2010. – №5. – С. 6–8.
11. Рыбачук, А.М. и др. Математическое моделирование физических процессов в дуге и сварочной ванне [Текст] / А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов : учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 74 с.: ил.

REFERENCES

- [1] Akulov A.I., Rybachuk A.M. Uderzhanie zhidkogo metalla svarochnoj vannы poperechnym magnitnym polem [Deduction of liquid metal of a welding bathtub cross magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1972, №2, ISSN 0491-6441, p. 3–6. (in Russian)
- [2] Karasev M.V., Doroshenko F.E., Kazakov A.A., Lyubochko D.A. Teknologicheskie osobennosti vypolneniya razlichnyh sloev shva pri avtomaticheskoy svarke truboprovodov [Technological features of performance of various layers of a seam at automatic welding of pipe ducts cooking production]. Svarka i diagnostika [Welding and preliminary treatment], 2014, №6, ISSN 2071-5234, p. 45–49. (in Russian)
- [3] Aleshin N.P., Gladkov E.A., Doronin Yu.V., Brodyagin V.N., Kuznecov P.S., Sholoxov M.A. Aktualnye voprosy svarki nepovorotnyh stykov truboprovodov v montazhnyh usloviyah [Topical issues of welding of non-rotary joints of pipe ducts in assembly conditions]. Svarka i diagnostika [Welding and preliminary treatment], 2013, №3, ISSN 2071-5234, p. 36–41. (in Russian)
- [4] Doronin Yu.V. Razrabotka teoreticheskikh osnov formirovaniya obratnoj storony shva s uchedom fiziko-khimicheskikh processov v svarochnoj vanne i sozdanie novykh svarochnykh materialov dlya odnostoronnej dugovoy svarki stalej plavyashhimsya elektrodom [Development of theoretical bases of formation of the underside of a seam taking into account physical and chemical processes in a welding bathtub and creation of new welding materials for unilateral arc welding staly the melting electrode]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [thesis of the Doctor of Engineering]. M. 2010, 352 p. (in Russian)
- [5] Popel S.I. Poverhnostnye yavleniya v rasplavah [The superficial phenomena in fusions]. M. Pub. Metallurgia [Metallurgy], 1994, ISBN 5-229-01037-1, 432 p. (in Russian)
- [6] Berezovskij V.M. Optimizatsiya formy shva pri nepreryvnom proplavlenii bez podkladki [Optimization of a form of a seam at unlined continuous pro-melting]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1988, №3, ISSN 0491-6441, p. 29–31. (in Russian)
- [7] Bockris J.O'M. Investigation into structure of liquid silicates. Rev. Chemical, 1955, №1, ISSN 0009-2665, p. 234–237. (in English)
- [8] Pohodnya I.K., Suptel A.M., Shlepakov V.N. Svarka poroshkovej provolokoj [flux cored welding]. Kiev. Pub. Naukova dumka [Scientific thought], 1972, 224 p. (in Russian)
- [9] Chigarev V.V. Vliyanie shihty serdechnika na elektrosoprotivlenie poroshkovej lenty [Center hub furnace charge influence on resistance of a powder tape arch powder wire] Sovremennyye problemy svarki i rodstvennykh tekhnologiy, sovershenstvovanie podgotovki kadrov [Modern problems of welding and related technologies, training improvement] : Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferentsii [theses of reports of the International scientific and methodical conference]. Mariupol: PGTU [PSTU], 2001, p. 16–17. (in Russian)
- [10] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Silovoe vozdejstvie konusnoj dugi na elektrod i svarochnuyu vannu [Power impact of a conical arch on an electrode and welding tub]. Svarka i diagnostika [Welding and preliminary treatment], 2010, №5, ISSN 2071-5234, p. 6–8. (in Russian)
- [11] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov v duge i svarochnoj vanne [Mathematical modeling of physical processes in an arch and a welding tub] : Uchebnoe posobie [manual], M. Pub. "Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana" [Bauman Moscow State Technical University Publishing House], 2007, ISBN 978-5-7038-2941-7, 74 p. (in Russian)

Formation Process Modeling of the Seam Underside on Weight when One-side Welding Pipe Root Joints by Metal Cored Wire

A.M. Rybachuk*¹, Gu. Czigany*², Yu.V. Doronin**³, P.S. Kuznetsov**⁴

* Bauman Moscow State Technical University,
5 Vtoraya Baumanskaya St., Moscow, Russia 105005

** Certification Center of Municipal Economy (CCME),
47a Izmajlovskoy Shosse, Moscow, Russia 105187

¹ e-mail: amrybachuk@mail.ru ; ² e-mail: gujieren12345@163.com ;

³ e-mail: bekkenbauer@yandex.ru ; ⁴ e-mail: psm Maiden@gmail.com

Abstract – In work formation process of the seam root roller at one-side arc welding by metal cored wire on weight is simulated. Influence of physical and chemical properties of liquid metal on border with the gas environment on formation process of seam return roller surface is shown. Pressure force calculation of arch is made.

Keywords: one-sided welding, seam root, arc pressure, viscosity, interfacial tension.