

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

УДК 621.791.01

**ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ  
ТРУБОПРОВОДОВ РЕАКТОРОВ АЭС**

© 2014 г. Д.В. Могилевский, Р.В. Пирожков, Т.А. Литвинова

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.*

Подобраны оптимальные сварочные параметры, которые позволяют добиться стабильного получения качественного сварного соединения. Приведена методика расчета сварочных параметров в зависимости от пространственного положения сварочной ванны.

*Ключевые слова:* сварные соединения, сварочная ванна, трубопроводы.

Поступила в редакцию 08.07.2014 г.

Для сварки в условиях ремонта и монтажа трубопроводов в основном применяются дуговые способы сварки, причем ручная сварка (аргонодуговая, покрытыми электродами) позволяет в отдельных случаях получать сварные соединения высокого качества. Однако при крупномасштабном и высокоответственном производстве ручные способы сварки не обеспечивают строгого соблюдения технологического процесса и контроля его параметров и, как следствие, – стабильности качества сварных соединений. При наличии вредного воздействия окружающей среды или опасных условий проведения работ на качество сварного соединения весьма негативное влияние оказывает психологическое состояние персонала, ограниченность средств и контроля. Необходимость устранения указанных недостатков, повышенные требования к надежности и качеству сварных соединений трубопроводов, улучшения условий труда одной из наиболее вредных производственных профессий определяют необходимость использования автоматизированной аргонодуговой орбитальной сварки (сварки неповоротных стыков труб). Применение защитной аргоновой среды позволяет получить более качественный сварной шов, позволяя предотвратить химические изменения в металле соединения [1].

Однако при использовании сварочных автоматов существует проблема сложности обеспечения стабильности получения качественных соединений. В частности, эта проблема встала при сварке корневых швов трубопроводов системы охлаждения атомного реактора, где до 30% сваренных швов не соответствуют требованиям НТД и нуждается в повторной пересварке. Поэтому актуальной задачей является разработка таких средств, которые позволили добиться стабильного получения качественных сварных соединений. В частности данные исследования направлены на подбор оптимальных и необходимых сварочных параметров.

*Закономерности формирования проплава при сварке неповоротных стыков труб.*

Для выявления особенностей формирования проплава при сварке неповоротных стыков труб, был проведен расчет высоты обратного валика  $h$ .

Основными геометрическими параметрами зоны проплава являются ширина шва  $B$  и высота проплава  $H$ , называемая в дальнейшем просто проплавом (рис. 1).

Ширина шва рассчитывается по формулам, основанным на теории

теплопроводности [2].

При данной ширине шва величина  $h$  может быть найдена по известному радиусу кривизны поверхности  $R$ .

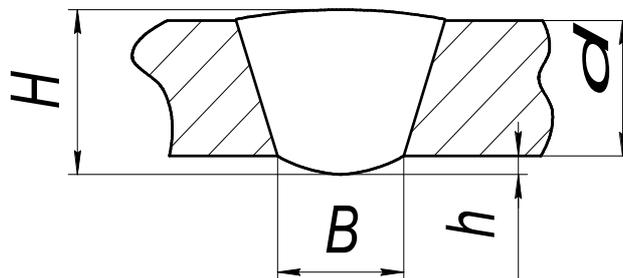


Рис. 1. – Геометрические параметры зоны проплава

Кривизну поверхности сварочной ванны определяли равновесием внешних сил (рис. 2) и силы поверхностного натяжения, описываемым уравнением Лапласа.

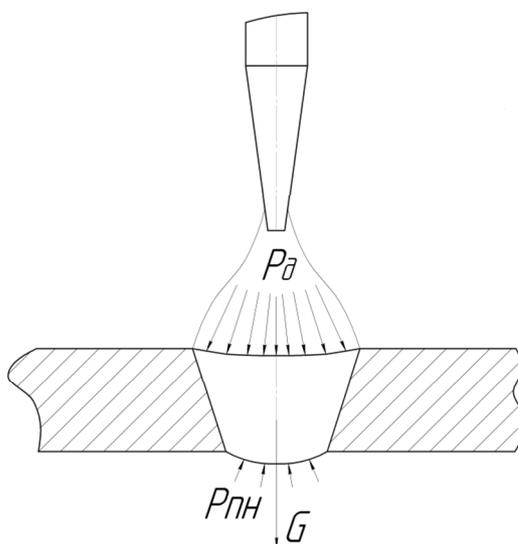


Рис. 2. – Силы, действующие на сварочную ванну

При применении уравнения Лапласа к сварочной ванне, во-первых, необходимо учитывать поправку на неизотермические условия на границе металл-газ (со стороны, противоположной сварочной дуге) и, во-вторых, можно пренебречь силой поверхностного натяжения, вызываемой кривизной верхней поверхности ванны. При этом условие равновесия и запишется в виде:

$$G + P_d - N = P_{пн}$$

где  $G$  – вес ванны;  
 $P_d$  – давление дуги;  
 $N$  – поправка на неизотермические условия;  
 $P_{пн}$  – сила поверхностного натяжения, связанная с кривизной нижней поверхности.

По опытным данным,  $N=0,23G$  [2], и тогда:

$$0,77G + P_d = P_{пн}$$

Это уравнение, строго говоря, справедливо лишь для случая ванны с осевой симметрией относительно дуги, т.е. при неподвижной дуге, но для простоты расчетов мы воспользуемся им и для перемещающейся дуги применительно к аргонно-дуговой сварке материала толщиной до 6 мм, когда отношение ширины ванны  $B$  к ее длине  $L$ , обычно более 0,6.

Для упрощения расчета примем, что поверхность ванны является поверхностью с кривизной в одном направлении (т.е.  $R_1=R$ , а  $R_2=\infty$ ). Тогда разность давлений, возникающая на искривленной границе раздела в любой точке:

$$p = \frac{\sigma}{R}$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение.

При этом опытные значения полученных  $h$  при сварке других типоразмеров труб больше расчетных. Расхождения вызываются, очевидно, деформацией поверхности ванны вследствие текучести металла, не учитываемой расчетной схемой. Характер и величина деформации зависят от наклона ванны в силу различного расположения дуги то отношению к направлению течения металла и различного гидростатического давления металла вследствие разного наклона кромок ванны.

В большинстве случаев одностороннюю сварку кольцевых стыков трубопроводов приходится выполнять без применения подкладок (медных, флюсовых и др.), поэтому при сварке металла толщиной более 3-4 мм применяют специальную (рис. 3) разделку кромок.

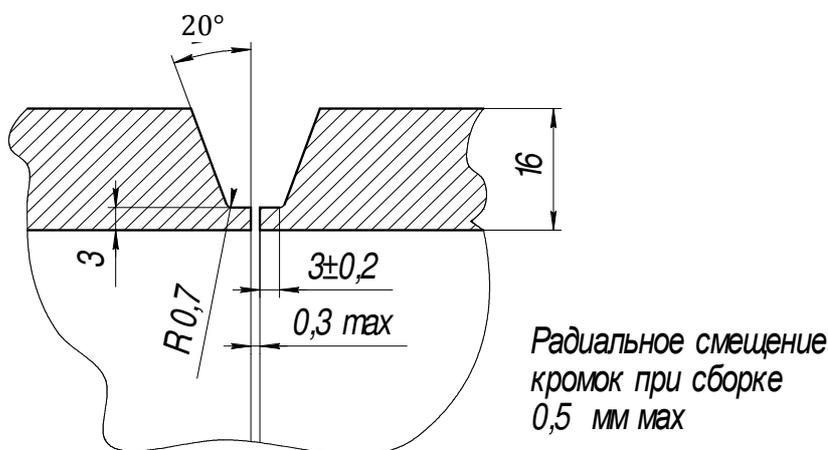


Рис. 3. – Схема разделки кромок при сварке металла толщиной более 3 мм

В этом случае предусматривают определенные размеры притупления кромок: ширину и толщину образовавшейся полки и величину зазора в корневой части стыка при сварке корневого шва (ПН АЭ Г-7-009 - 89. ОП). Ширина полки позволяет управлять силой поверхностного натяжения наружной поверхности ванны на границе фаз "жидкий металл – газ", а толщина притупления  $\delta_{II}$  определяет массу ванны, удерживаемой силой поверхностного натяжения поверхности проплава с поверхностью, обеспечивающей требуемую величину выпуклости при сварке в нижнем положении и на подъем. При этом ширина полки и толщина притупления ее в корневой части стыка обеспечивают также возможность воздействия на наружную поверхность ванны, что позволяет дополнительно управлять формированием корневого слоя при сварке в потолочном положении. При определенной ширине полки наружная поверхность ванны за счет смачивания кромок разделки жидким металлом приобретает

кривизну, которая вместе с массой ванны уменьшает вогнутость шва при сварке в потолочном положении и на спуск, удерживая сварочную ванну от провисания и образования вогнутости.

Ориентировочные значения допускаемых размеров в собираемых стыках, а также выпуклости или вогнутости корневого шва в зависимости от толщины стенки свариваемых труб при TIG- и MIG/MAG-сварке. Смещение кромок (несовпадение торцовых поверхностей собираемых трубопроводов), как правило, не должно превышать 12 % толщины стенки, но не более 0,5 мм.

Для расчетов режимов орбитальной сварки неповоротных стыков воспользуемся «моделью управления дуговой сваркой неплавящимся электродом без присадочной проволоки» [3].

По ней известно, что:

$$G + P_{\partial} = P_{\text{пн}}, \quad (1)$$

$$P_{\partial} = 1,27 \cdot 10^{-5} \cdot I^2, \quad (2)$$

$$G_{\partial} = \frac{0,121\gamma\eta^2}{4\lambda(c\gamma)^2 T_{\text{пл}}^2} \cdot \frac{q_0^3}{V_{\text{св}}^2 \delta^2}, \quad (3)$$

$$P_{\text{пн}} = 19,5\sigma H, \quad (4)$$

где  $c, \gamma, \lambda, T_{\text{пл}}$  – теплофизические свойства (теплопроводность, плотность, теплопроводность, температура плавления, соответственно) основного металла,

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,

$H$  – величина проплава.

Данная модель действительна для нижнего положения.

Для расчета при сварке в положении, отличного от нижнего, уравнения требуют корректировки, так как направление силы тяжести не совпадает с направлением нормали к поверхности свариваемого металла. Ввиду этого введем в эти уравнения вместо веса ванны  $G$  его проекцию на направление нормали к поверхности металла ( $G \cdot \cos \alpha$ ). Угол  $\alpha$  отсчитывается от зенита против часовой стрелки (рис. 4).

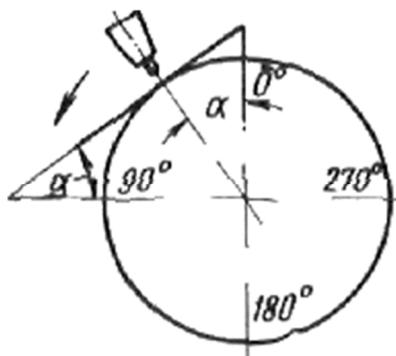


Рис. 4. – Схема для расчета при положениях, отличных от нижнего

Сопоставив уравнение (2), (3) и (4) получим следующее:

$$\frac{0,121\gamma\eta^3}{4\lambda(c\gamma)^2 T_{\text{пл}}^2} \cos \alpha \cdot \frac{q_0^3}{V_{\text{св}}^2 \delta^2} + 1,27 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 = 19,5\sigma H,$$

где  $q_0$  – полная мощность дуги,  $q_0 = 0,24UI$ .

Значение ширины проплава  $B$  для нижнего положения рассчитываем по следующей формуле:

$$B = \frac{0,484\eta_u}{V_{св}c\gamma\delta 2y_0} \quad (5)$$

В других положениях рассчитывается по формуле:

$$G = \frac{\pi}{4}BL_6H\gamma, \quad (6)$$

где  $L_6$  – длина сварочной ванны.

Надтекание и подтекание металла предлагается моделировать изменением толщины  $\delta$ . При определении величины изменения толщины в зависимости от пространственного положения исходили из прямой зависимости изменения ширины шва  $B$  от изменения толщины  $\delta$ . Полученные значения отображены на графике (рис. 5).

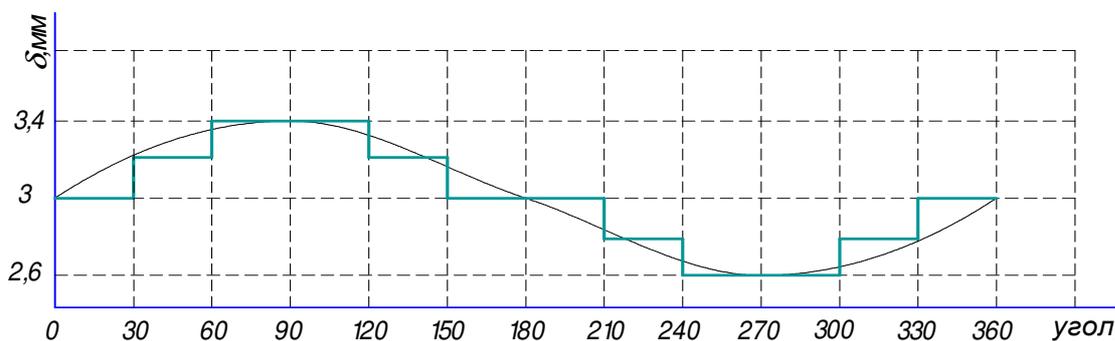


Рис. 5. – Изменение толщины в зависимости от пространственного положения

С учетом значения  $\delta$  и решая полученное уравнение, при различных пространственных положениях определяем размеры шва.

Выпуклость шва находим как разность между высотой проплава  $H$  и толщиной материала  $\delta$ :

$$h = H - \delta.$$

Согласно приведенной методике был проведен расчет режимов для сварки труб из стали 08X18N10 ( $T_{пл} = 1470^\circ$ ,  $\gamma = 7,9$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 16$  Вт/м·°С,  $c = 504$  Дж/кг·°С). В качестве вероятных режимов были выбраны и использованы в расчетах параметры сварки по штатной технологии ( $V_{св} = 3,7$  м/ч,  $U = 8$  В,  $I = 110$  А). Выходными параметрами расчета являются значения высоты обратного валика  $h$  и ширины шва  $B$ , к которым предъявлялся допуск соответствия ПН АЭ Г-7-009-89 по длине всего стыкового шва.

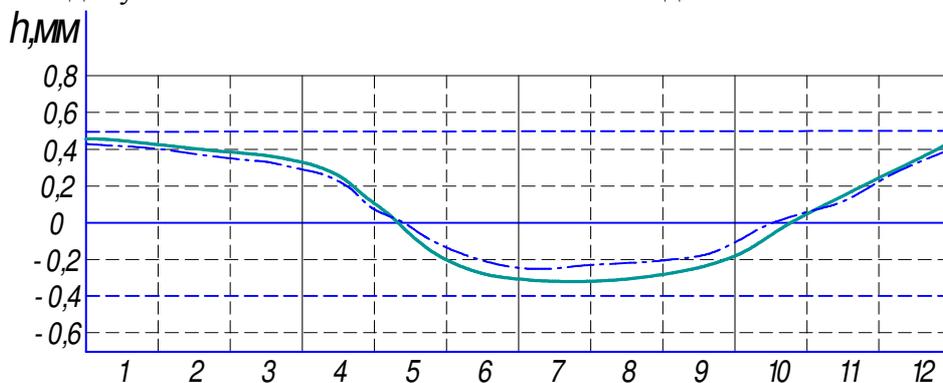


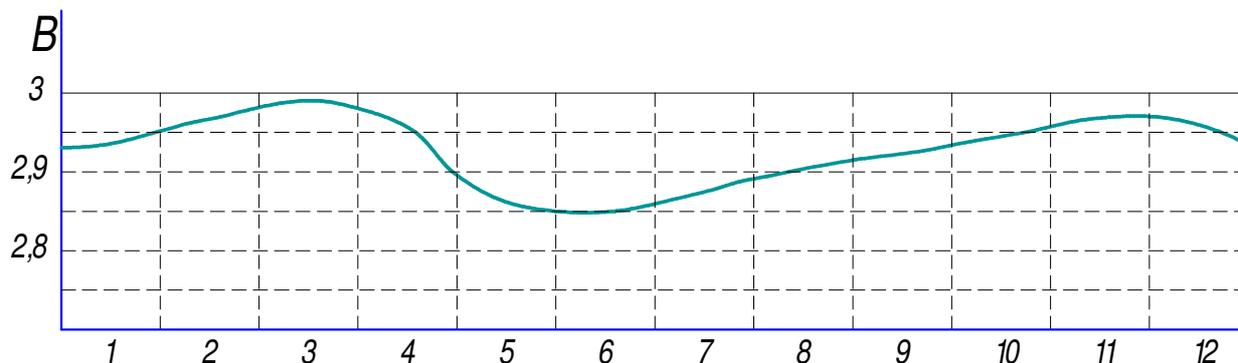
Рис. 6. – Изменение величины обратного валика в зависимости от пространственного положения, без зазора, с зазором  $z = 0,3$  мм

В результате анализа полученных данных был составлен вариант программы изменения режимов сварки корневого шва (табл. 1).

**Таблица 1.** – Программа изменения режимов сварки корневого шва

Участок (интервал $\alpha$ ), $^{\circ}$	Ток I, А	Скорость сварки $V_{св}$ , м/ч	Напряжение U, В
0-15	110	3,8	8
15-45	115	3,8	8
45-75	120	3,8	8
75-105	125	3,8	8
105-135	120	3,9	8
135-165	115	4	8
165-195	115	4	8
195-225	118	4,1	8
225-255	128	4,2	8
255-285	132	4,2	8
285-315	120	4,2	8
315-345	118	3,9	8
345-0	110	3,8	8

При использовании данной программы изменений режимов получили следующие показатели величин обратного валика и ширины проплава шва (рис. 6, 7).



**Рис. 7.** – Изменение ширины проплава в зависимости от пространственного положения в условиях сборки с зазором  $z=0,3$ мм

Подобная программа может быть применена и для прямолинейного шва. Однако не всегда можно обойтись условием постоянства основных параметров режима сварки на рабочем участке программы.

Температурное поле сварочной ванны изменяется по двум причинам: вследствие нестационарного теплового состояния ванны (что вызвано холодным металлом трубы в начале сварки) и вследствие встречного потока теплоты от дуги, который в зависимости от длины периметра стыка и мощности дуги подогревает сварочную ванну.

Начальную нестационарность теплового поля при сварке многих деталей можно ликвидировать вводом планки, на которой возбуждается дуга, но для стыка труб это неосуществимо. Можно применять начальный подогрев, задерживая дугу несколько секунд на месте. Такой прием не всегда дает хороший результат, так как ширина и

глубина кольцевого шва трубы изменяются по длине стыка, сваренного на постоянном режиме.

Более целесообразно корректировать тепловой режим в соответствии с изменением коэффициента теплонасыщения путем программного регулирования скорости сварки или тока дуги.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пирожков, Р.В. и др. Получение структуры стали 110Г13 методом электроконтактного уплотнения [Текст] / Р.В. Пирожков, Т.А. Литвинова, С.А. Томилин // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 4 (5). – С. 49–53.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600с.
3. Волченко, В.Н. Контроль качества сварных конструкций [Текст] / В.Н. Волченко – СПб. : Машиностроение, 1986. – 152 с.

### **Selection of Parameters for Automatic Welding of the Nuclear Reactors Pipelines**

**D.V. Mogilevsky\*, R.V. Pirozhkov\*\*, T.A. Litvinova\*\*\***

*Volgodonsk Engineering Technical Institute*

*the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

*\* e-mail: tvand@mail.ru; \*\* e-mail: roman-3.14@yandex.ru; \*\*\* e-mail: bratsk\_tanja@mail.ru*

**Abstract** – Optimal welding parameters admitting to achieve stable obtaining of qualitative joint weld were selected. Methods of calculation of welding parameters in relation to space attitude of welding pool are cited.

**Keywords:** joint welds, welding pool, pipings.

#### REFERENCES

- [1] Pirozhkov R.V., Litvinova T.A., Tomilin S.A. Poluchenie struktury stali 110G13 metodom jelektrokontaktnogo uplotnenija [Receiving structure of steel 110G13 by electrocontact consolidation method]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2012, №4(5), ISSN 2305-414X, pp. 49–53. (in Russian)
- [2] Lykov A.V. Teorija teploprovodnosti [Theory of heat conductivity]. M. Pub. Vysshaja shkola [The higher school], 1967. 600 p. (in Russian)
- [3] Volchenko V.N. Kontrol kachestva svarnyh konstrukcij [Quality control of welded designs]. Sankt-Peterburg. Pub. Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1986. 152 p. (in Russian)