

УДК 621.791.754

А.С. Павлов

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ СЛОЯ ШВА ПО ТОЛЩИНЕ ЖИДКОЙ ПРОСЛОЙКИ ПРИ СВАРКЕ В ЩЕЛЕВУЮ РАЗДЕЛКУ КРОМОК**

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева

Проведен анализ существующих методик определения толщины жидкой прослойки в сварочной ванне. Показано влияние основных параметров режима сварки, а также величины жидкой прослойки в сварочной ванне на глубину проплавления слоёв шва.

*Ключевые слова:* щелевая разделка, глубина проплавления, толщина жидкой прослойки, автоматическая сварка в защитных газах.

Толщина жидкой под дугой в сварочной ванне  $\delta_{ж}$  является главным параметром, определяющим стабильность проплавления слоя шва. В этой связи приобретает вопрос определения толщины  $\delta_{ж}$  расчетным или экспериментальным методами.

Известны расчетные методы определения толщины  $\delta_{ж}$ , полученные на основании решения тепловой или гидродинамической задач [1, 2]. Совместное решение этих задач с учетом факторов, обуславливающих тепломассоперенос в сварочной ванне, не представляется возможным.

Толщину  $\delta_{ж}$  при сварке мощным концентрированным источником нагрева (электронным лучем) находят из условия квазистационарного процесса переноса за счет теплопроводности. В работе [3] наряду со сложной аналитической зависимостью между толщиной  $\delta_{ж}$  и скоростью переноса жидкого металла, включающей большое количество теплофизических коэффициентов, определение которых, как и расчет  $\delta_{ж}$  затруднителен, для практических целей предложена приближительная формула

$$\delta_{ж} = 1/2(2l_n - d), \quad (1)$$

где  $d$  - диаметр кратера, см;  $2l_n$  - ширина зоны, нагреваемой выше температуры плавления, см.

Ширина зоны нагрева для мощного быстродвижущегося линейного  $l_n$  определяется по формуле, приведенной в [3]:

$$2l_n = \frac{q\sqrt{2}}{\sqrt{\pi e} \delta T_{пл} V_{св} S}, \quad (2)$$

где  $q$  - тепловая мощность источника нагрева, Вт;  $S$  - теплосодержание расплавленного металла, Вт/см;  $T_{пл}$  - температура плавления, °С;  $V_{св}$  - скорость сварки, см/с.

Следует заметить, что эта расчетная зависимость может быть использована при наличии глубокого цилиндрического канала минимальной толщины  $\delta_{ж}$  на его стенках. Однако в большинстве сварочных процессов форма ванны вытянута в хвостовой её части, поэтому в расчетных формулах, представленных в работах [4, 5], учитывается площадь проплавления на переднем фронте плавления сварочной ванны, форма которой близка к сферической. Используя геометрическую модель, в которой форма передней стенки сварочной ванны принималась сферической [2] или цилиндрической [3], а также основании решения тепловой задачи и ряда допущений выполнен расчет толщины  $\delta_{ж}$ , размер которой принят усредненным.

В этой модели принято:

1. Плавление металла заканчивается в передней части сварочной ванны; подогрев металла за счет тепла, выделяющегося в хвостовой части сварочной ванны не учитывается.

2. Поверхность жидкой прослойки  $\delta_{ж}$ , граничащая с дугой, имеет температуру кипения жидкого металла  $T_{кип}$ , а поверхность, граничащая с нерасплавленным металлом, имеет температуру плавления  $T_{пл}$ .

Толщину жидкой прослойки находят по формуле

$$\delta_{ж} = \frac{r_{п}}{F\chi(T_{к}-T_{п})} + 1 \quad (3)$$

где  $r_{п}$  - радиус изотермы плавления, см;  $q_{э}$  - эффективная тепловая мощность сварочной дуги, Вт;  $\chi$  - коэффициент теплопроводности, Вт/см;  $F$  - площадь проплавления, см<sup>2</sup>;  $T_{к}$  - температура кипения жидкого металла, °С;  $T_{п}$  - температура плавления жидкого металла, °С.

В [6] величину прослойки жидкого металла под дугой  $\delta_{ж}$  предлагается определять по формуле (2), вводя вместо  $\chi$  эффективный коэффициент теплопроводности  $\chi_{э}$ , учитывающий тепломассоперенос в сварочной ванне, что, по мнению авторов, повышает точность полученного решения. Однако для определения  $\chi_{э}$  необходимо решить критерияльное уравнение при движении жидкости, имеющее вид:

$$N_{и} = f(Rl Rr) , \quad (4)$$

где  $N_{и}$ ,  $Rl$ ,  $Rr$  – критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандля соответственно.

Находить значения этих критериев применительно к расплаву сварочной ванны, имеющему различную температуру на поверхности и на границе с твердым металлом, затруднительно, так как необходимо знать изменения температуры.

В расчетную формулу (3) авторами работы [2] вводится значение полного теплового потока, включающего две составляющие: тепловой поток, необходимый для проплавления основного металла  $q_{пр}$ , и тепловой поток, идущий на подогрев  $q_{п}$ .

Значения  $q_{пр}$  и  $q_{п}$  определяются по формулам

$$q_{п} = F_{п} \gamma_{т} S_{п} V_{св} ; \quad (5)$$

$$q_{пр} = F_{пр} \gamma_{ж} S_{ж} V_{св},$$

где  $F_{п}$  и  $F_{пр}$  - площадь проплавления и подогрева, см<sup>2</sup>;  $\gamma_{т}$  и  $\gamma_{ж}$  - удельный вес твердого и жидкого металла, г/см<sup>3</sup>;  $S_{п}$  и  $S_{ж}$  - теплосодержание расплавленного и подогретого металла, Вт/см<sup>2</sup>.

Следует отметить некоторое несоответствие расчетных и экспериментальных значений толщины жидкого слоя, определяемого по известной методике [2]. Для устранения этого несоответствия используют поправочные коэффициенты [4].

На интенсивность теплопередачи влияет величина скорости движения металла  $V_{м}$ , определяемая геометрическими размерами жидкой прослойки ( $\delta_{ж}$ ).

В [7] расчет  $\delta_{ж}$  и  $V_{м}$  ведется решением гидродинамической задачи. Для этого также рассматривается движение расплава у передней стенки сварочной ванны. Толщина  $\delta_{ж}$  определяется из решения системы уравнения количества движения жидкости и неразрывности потока. Для решения этих уравнений приходится задавать определенную форму переднего фронта ванны в виде сферы [7].

В [1] принято, что на одном уровне каждого сечения ванны толщина  $\delta_{ж}$  постоянна. Показано, что значения  $\delta_{ж}$  максимальны под дугой в осевой зоне шва, в которой скорость движения расплава минимальна. Значение  $\delta_{ж}$  существенным образом определя-

ется конфигурацией и размерами сварочной ванны, зависящими от тепловой мощности дуги и положения её активного анодного пятна, в центре которого газодинамическое давление максимально и, следовательно, максимальный прогиб поверхности ванны и минимальная толщина  $\delta_{ж}$ . Другим фактором, от которого зависит толщина  $\delta_{ж}$ , является угол наклона электрода.

Именно этими обстоятельствами и наличием конвективных потоков объясняются различные значения  $\delta_{ж}$  в [1, 2, 7, 8]. В [8] указывается на активную роль жидкой прослойки под дугой, определяющей передачу тепла от нагрева к фронту плавления. В этой работе значения  $\delta_{ж}$  определяются по следующей зависимости:

$$\delta_{ж} = h_{пр} + a - l, \quad (6)$$

где  $h_{пр}$  - глубина проплавления, см;  $a$  - расстояние от конца электрода до поверхности детали, см;  $l$  - длина дуги, см.

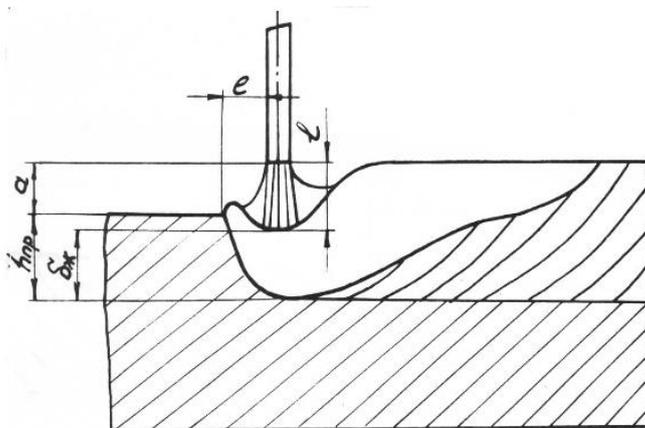


Рис. 1. Схема определения  $\delta_{ж}$

Значение  $\delta_{ж}$  по предлагаемой формуле значительно превышает полученное в работах [7, 8]. Существенные различия  $\delta_{ж}$  можно объяснить подтеканием расплавленного металла сварочной под дугу и перед дугой, что может вызвать изменения толщины  $\delta_{ж}$  под дугой. Это связано, по-видимому, с колебательными движениями жидкого металла в сварочной ванне (гидродинамическими возмущениями), в результате которых изменяются условия вытеснения расплавленного металла. Следует заметить, что наиболее значительные изменения толщины  $\delta_{ж}$  на переднем фронте плавления сварочной ванны происходят при сварке мощным быстродействующим источником нагрева.

Процесс в щелевую разделку, как показывает практика, целесообразно вести при небольшой мощности дуги. При поперечных её колебаниях можно достичь более равномерного распределения жидкой прослойки под дугой и получения формы сварочной ванны близкой к сферической. Это может быть выполнено при условии оптимизации параметров режима сварки. При этом условии представляется возможным расчетное определение толщины  $\delta_{ж}$  производить по формуле (3), полученной решением тепловой задачи. В процессе сварки необходимо производить оперативное изменение и контроль толщины  $\delta_{ж}$ .

Экспериментальное определение толщины жидкой прослойки под дугой по известной методике производят с помощью тугоплавкого (танталового или вольфрамового) зонда, располагаемого по центру свариваемого стыка. В процессе сварки зонд, находящийся выше уровня жидкого металла, оплавляется под действием дуги и по величине оставшейся нерасплавленной части зонда в приготовленном шлифе определяют толщину  $\delta_{ж}$  [1] по схеме (рис. 2).

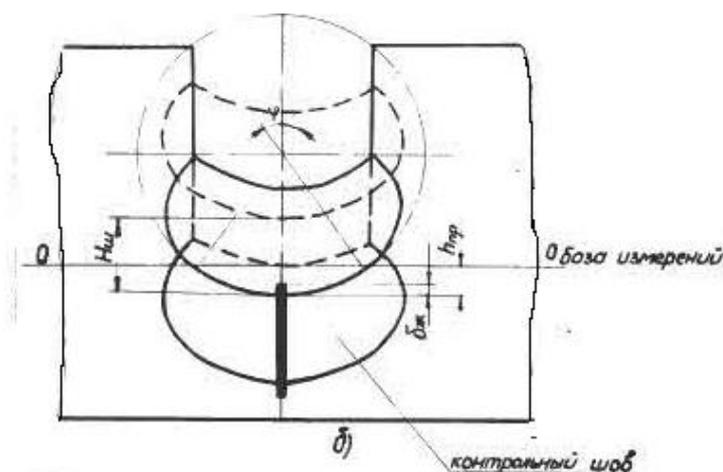


Рис. 2. Схема измерения толщины жидкой прослойки  $\delta_{ж}$  и глубины проплавления  $h_{пр}$

Указанная методика имеет следующие существенные недостатки:

- 1) отсутствие гарантии полного оплавления конца зонда до границы кратер-жидкая прослойка. Вследствие этого, а также из-за возникающих погрешностей при выставлении зонда по оси свариваемого стыка при колебаниях дуги точность определения  $\delta_{ж}$  низкая;
- 2) некоторое приближенное представление о толщине  $\delta_{ж}$  в осевой зоне и у кромки можно получать при измерении двумя зондами;
- 3) значительная трудоёмкость изготовления макрошлифов сварных соединений;
- 4) наличие конвективных потоков оказывает влияние на точность измерения значений  $\delta_{ж}$ ;
- 5) нет возможности производить измерение и контроль толщины  $\delta_{ж}$  в процессе сварки.

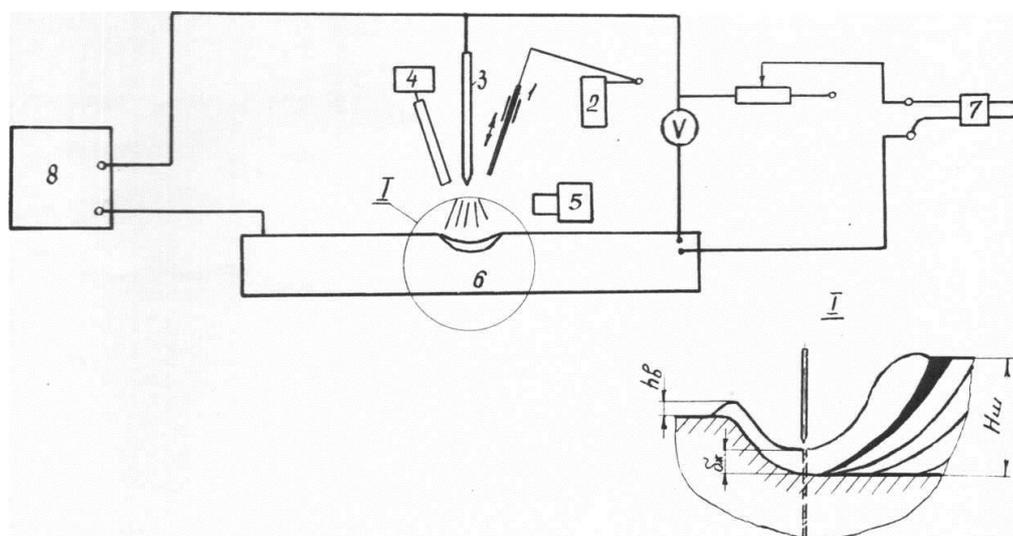
В основу новой методики положен принцип зондирования сварочной ванны погружением тугоплавкого зонда и смачивание его конца жидким металлом. Измерение толщины  $\delta_{ж}$  производилось на основе использования различной проводимости плазмы дуги и жидкого металла. Известно [8], что проводимость плазмы аргоновой дуги  $j_{п} = 0,2-1,0 \text{ ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  при токе в интервале 20 до 300 А, а проводимость жидкой стали с содержанием 0,2-0,4 % С при температуре  $T = 1500^{\circ} - 1700^{\circ}$  составляет  $\delta_{ж} = 7 \cdot 10^5 \text{ ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ .

Изучение процесса зондирования сварочной ванны производили в ходе экспериментальных исследований с помощью установки, схема которой приведена на рис. 3.

Измерение толщины  $\delta_{ж}$  проводили в процессе автоматической сварки в щелевую разделку неплавящимся электродом труб сечением  $\Phi 200 \times 15$  мм из стали 30 ХГСН2А. Параметры режима сварки: сварочный ток  $I_{св} = 150$  А, напряжение дуги  $U_{д} = 9-10$  В, скорость сварки  $V_{св} = 5-6$  м/ч, скорость подачи присадочной проволоки  $\Phi 1,6$  мм составляла  $V_{пн} = 20-25$  м/ч. Зондом являлась вольфрамовая проволока диаметром  $\Phi 0,5$  мм, размещенная в кварцевой трубочке диаметром  $\Phi 1,3$  мм. Скорость перемещения зонда  $V = 0,5$  м/с. Частота погружения зонда составляла 3 опускания в минуту.

Процесс зондирования осуществляли следующим образом. Ориентировали тугоплавкий зонд в положение, приближенное к перпендикулярному к поверхности сварочной ванны. Затем включали источник питания и устанавливали параметры режима сварки. После образования расплавленной сварочной ванны на изделии б включали электромагнит, перемещающий зонд в зону дуги (в непосредственной близости от конца электрода) и производили его погружение в ванну при одновременном осциллографи-

ровании и киносъёмке процесса до момента достижения зондом стенки твердого металла. При упоре зонда в твердую стенку включался электропневмоклапан и начиналось выдувание расплавленного металла сварочной ванны струёй защитного газа (аргона), синхронно с процессом выдувания выключали источник питания и гасили дугу.



**Рис. 3. Принципиальная схема установки для зондирования сварочной ванны:**

1 - зонд; 2 - электромагнит; 3 - электрод; 4 - электропневмоклапан; 5 - кинокамера; 6 - свариваемое изделие; 7 - шлейфовый осциллограф; 8 - источник питания;  $H_{ш}$  - толщина наплавленного металла шва;  $h_{в}$  - высота гребня вытесненного металла сварочной ванны давлением дуги;  $\delta_{ж}$  - толщина прослойки жидкого металла

Тугоплавкий зонд после смачивания мог возвратиться с помощью электромагнита в исходное положение без выплескивания сварочной ванны и гашения дуги. В этом случае процесс сварки не прекращался, но и не фиксировалась точка касания дна зондом.

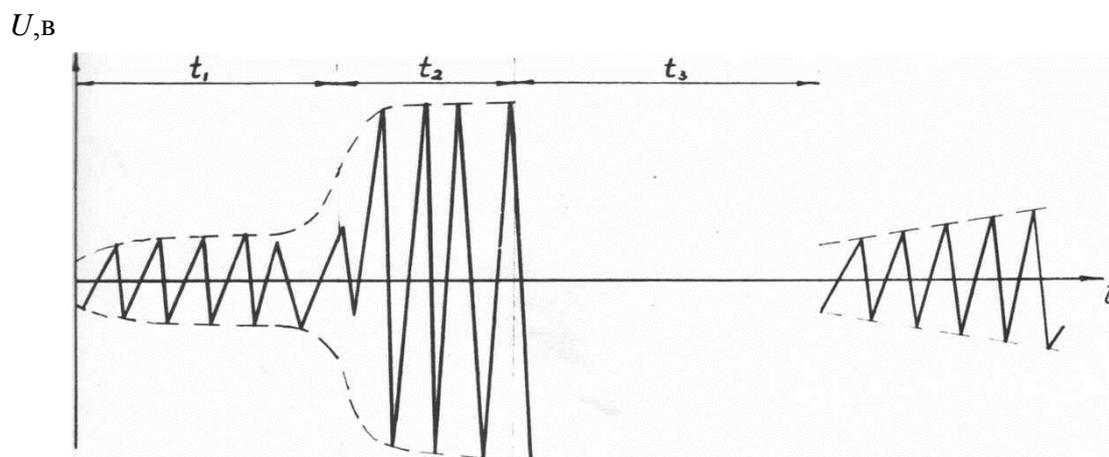
Толщину  $\delta_{ж}$  определяли по длине смоченной расплавленным металлом части зонда. Для облегчения смачивания зонда на одну из его сторон, обращенную противоположно дуге, предварительно наносили медное покрытие.

При измерениях с наклоном зонда по отношению к электроду вводился поправочный коэффициент, учитывающий значение угла наклона. По кинограммам строили зависимости перемещения зонда во времени и, совмещая с осциллограммой напряжения, строили зависимость распределения потенциала по длине дуги, определяли положение зонда в момент ввода в сварочную ванну и место соприкосновения с твердым металлом.

После серии проведенных замеров  $\delta_{ж}$  в процессе сварки в продольном и поперечном направлении сварочной ванны удается с достаточно высокой точностью определить конфигурацию распределения жидкой прослойки в сварочной ванне без использования целого ряда зондов, согласно методике, приведенной в [1].

Форма сварочной ванны, полученная на основании замеров, близка к реальной форме, полученной после выдувания. Точность измерения толщины  $\delta_{ж}$  за счёт смачивания была сравнительно невысокой (10-20%), имел место разброс значений  $\delta_{ж}$ , вызванный неравномерной смачиваемостью конца зонда. Для повышения точности измерений использовался сигнал, снимаемый с зонда (датчика) при его погружении в сварочную ванну. При касании зондом сначала поверхности расплавленного металла сварочной ванны и далее твердого металла (дна ванны) изменяется сигнал в цепи датчика, величина которого фиксируется в блоке измерения толщины слоя жидкого металла ( $\delta_{ж}$ ). На выходе этого блока фиксируется пропорциональный  $\delta_{ж}$  в виде напряжения.

Процесс регистрации параметров датчика (длины дуги и толщины  $\delta_{ж}$ ) иллюстрирован осциллограммой напряжения (рис. 4).



**Рис. 4. Изменение напряжения при зондировании сварочной ванны:**

$t_1$  - время прохождения зондом дуги;  $t_2$  - время погружения зонда в слой жидкого металла;  $t_3$  - время регулирования глубины проплавления

Абсолютное значение длины дуги  $l_d$  и толщины слоя жидкого металла  $\delta_{ж}$  определяли по следующим зависимостям:  $l_d = Vt_1$  и  $\delta_{ж} = Vt_2$ , где  $V$  - скорость погружения, м/с. Проводилась серия замеров по предлагаемой и известной методикам определения  $\delta_{ж}$ , по результатам которых установлено, что величина отклонений значений по предлагаемой методике составляла не более 5%, а по известной - 20% (табл. 1).

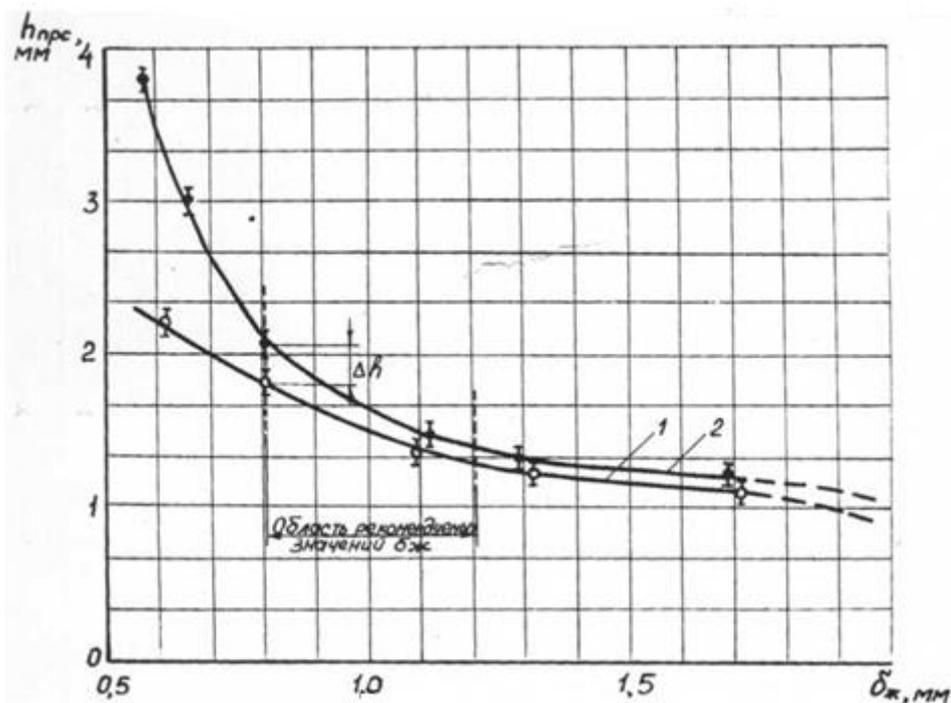
Измерение толщины  $\delta_{ж}$  производили в зонах, отстоящих от оси щелевого шириной  $b_{щ} = 8 +^2$  на расстоянии  $0,1-0,15 \delta_{ж}$ . Зависимость между глубиной проплавления слоя шва  $h_{прс}$  и толщиной жидкой прослойки  $\delta_{ж}$  показана на рис. 5. Параметры режима изменяли в следующих пределах: сварочный ток  $J_{св} = 150-600$  А, скорость сварки  $V_{св} = 4-15$  м/ч, скорость подачи присадочной проволоки  $V_{пп} = 4-50$  м/ч. Расчетные и экспериментальные данные толщины жидкой прослойки под дугой приведены в табл. 2.

**Таблица 1**

№ серии опытов	Размер толщины $\delta_{ж}$ , мм	
	по известной методике	по предлагаемой методике
1	1,15	1,0
2	0,94	1,01
3	0,96	1,02
4	1,1	1,0
5	0,8	0,99

**Таблица 2**

Эффективная тепловая мощность источника $q_э$ , Вт	Площадь проплавления $F_{пр}$ , см <sup>2</sup>	Глубина проплавления $h_{прс}$	Толщина жидкой прослойки $\delta_{ж}$ , см	
			расчетные данные	экспериментальные данные
33	0,012	0,092	0,072	0,078
64,5	0,0194	0,19	0,126	0,119
94,5	0,024	0,183	0,152	0,159



**Рис. 5. Зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{\text{прс}}$  от толщины жидкой прослойки  $\delta_{\text{ж}}$  (минимальные 1 и максимальные 2 значения  $h_{\text{прс}}$ )**

Экспериментально установлена корреляционная зависимость между значениями  $h_{\text{прс}}$  и  $\delta_{\text{ж}}$  вида  $h_{\text{прс}} = 1,2 \delta_{\text{ж}}^2 - 6,5 \delta_{\text{ж}} + 6,9$ .

Таким образом, применение данной методики позволяет определять не только толщину  $\delta_{\text{ж}}$ , но и с высокой достоверностью фиксировать профиль поверхности сварочной ванны, что, в свою очередь, позволит использовать её при создании устройства для автоматического регулирования глубиной проплавления слоя шва при многослойной сварке в щелевую разделку кромок.

#### Библиографический список

1. Чернышов, Г.Г. Определение толщины слоя жидкого металла на переднем фронте сварочной ванны / Г.Г. Чернышов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1979. – №10. – С. 9–10.
2. Размышляев, А.Д. Гидродинамические параметры пленки жидкого металла на передней стенке кратера ванны при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 1982. – №1. – С. 20–25.
3. Ольшанский, Н.А. Перемещение расплавленного металла в процессе электроннолучевой сварки / Н.А. Ольшанский, А.М. Гуткин, Г.Д. Гириманджи // Сварочное производство. – 1974. – №9. – С. 12–14.
4. Размышляев, А.Д. О толщине прослойки жидкого металла под дугой при наплавке под флюсом // Автоматическая сварка. – 2003. – №9. – С. 18–21.
5. Суздаев, И.В. Влияние параметров режима сварки на форму и размеры кратера сварочной ванны и толщину жидкой прослойки под дугой / И.В. Суздаев, Б.М. Березовский, В.К. Прохоров // Сварочное производство. – 1988. – №8. – С. 35–36.
6. Чернов, А.В. Определение толщины жидкой прослойки под дугой / А.В. Чернов [и др.] // Известия вузов. – Машиностроение. – 1978. – №9. – С. 131–134.
7. Гулаков, С.В. Влияние переноса тепла потоком жидкого металла на форму сварочной ванны / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Сварочное производство. – 1982. №11. – С. 2–3.

8. **Чернышов, Г.Г.** Распределение тока в сварочной ванне / Г.Г. Чернышов [и др.] // Автоматическая сварка. – 1979. – №11. – С. 27–29.
9. **Савинов, А.В.** Определение профиля свободной поверхности сварочной ванны при дуговой сварке // А.В. Савинов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2010. – №1. – С. 24–27.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2018*

**A.S. Pavlov**

**DEVELOPMENT OF METHODS OF OPERATIONAL CONTROL  
OF THE PENETRATION LAYER OF THE WELD THROUGH THE THICKNESS  
OF THE LIQUID LAYER WHEN WELDING IN A NARROW GROOVE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** To produce high-quality layer in weld pool by multilayer welding in slotted hums ensuring a stable penetration depth and desired shape of each later with the optimal thickness of the liquid layer the weld pool.

**Approach:** An experimental studying the process of obtaining quality multilayer connection in clotted hums using the device for determine the depth of penetration.

**Findings:** The development of a technique for determining the thickness of the liquid layer the weld pool. Carried out processing of experimental results using metallographic studies.

**Research implications:** Comparative studies have shown that thickness of the liquid layer in weld pool performing by experimental and computational methods are similar.

**Adventure:** The proposed method for measure thickness of the liquid layer in the weld pool is easier then existing methods. New method realized the high quality of connection

*Key words:* slit edge preparation, deph of penetration, thickness interlayer liquid metal, automatic welding in shielded gas.