

УДК 621.791.754

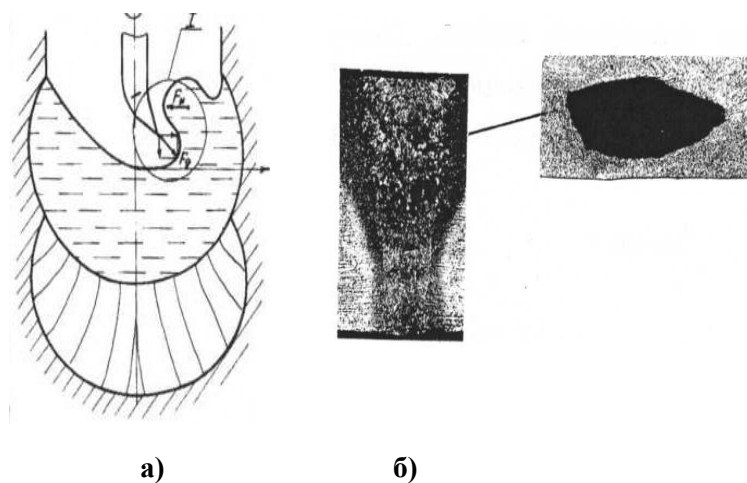
А.С. Павлов<sup>1</sup>, Н.М. Ванюшкин<sup>2</sup>**ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ШВА  
ГАЗОНАПРАВЛЕННОЙ СТРУЁЙ  
ПРИ СВАРКЕ В ЩЕЛЕВУЮ РАЗДЕЛКУ КРОМОК**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
АО Ковылкинский электромеханический завод<sup>2</sup>

Исследован процесс формирования многослойного шва газонаправленной дополнительной струёй при автоматической аргодуговой сварке в щелевую разделку кромок. Показано влияние основных параметров режима сварки, а также изменения размера и расположения газового сопла на формирование слоёв шва.

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

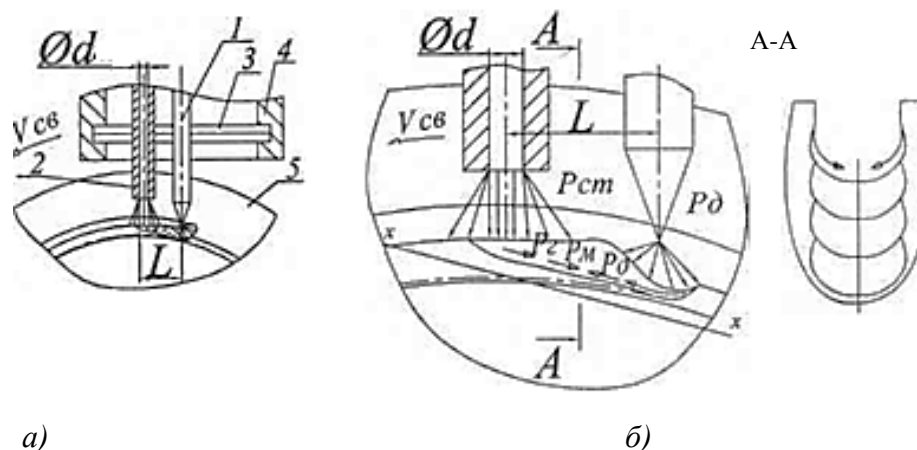
Критерием качественного формирования сварного соединения при многослойной сварке неплавящимся электродом цилиндрических деталей и исключении глубоких подрезов на вертикальных стенках щелевого зазора является наличие вогнутой формы поверхности каждого слоя шва [1, 2]. Для получения этой благоприятной формы в процессе сварки используются поперечные колебания при вращении изогнутого неплавящегося электрода. Однако наряду с этим, из-за кривизны образовавшегося вогнутого профиля при оплавлении и стекании части металла со стенок под воздействием силового воздействия дуги при поперечном перемещении её в щелевом зазоре в центральной зоне хвостовой части сварочной ванны образуется выпуклый гребень расплавленного металла, а формирование поверхности сварного шва нарушается. Движение металла у передней стенки ванны при маятниковом колебании дуги приобретает волновой характер и оказывает существенное влияние на изменение толщины жидкой прослойки под дугой, и как следствие, уменьшение глубины проплавления металла.

Наиболее опасной зоной является место встречи сварочной дуги при её поперечном перемещении с отраженной от стенки щелевой разделки волной жидкого металла, поскольку в нём наиболее вероятно появление несплавления шва с проплавляемой поверхностью (рис. 1).



**Рис. 1. Перемещение гребня вытесненного металла сварочной ванны при колебаниях дуги (а) и макрошлиф сварного шва с дефектом несплавления (б)**

В настоящее время наметилась тенденция совершенствования технологии сварки с управлением качеством шва воздействием на сварочную ванну дополнительными струями аргона [3, 4]. Для снижения вероятности появления межслойных несплавлений, а также изучения особенностей формирования слоёв шва исследовали процесс автоматической сварки неплавящимся электродом при его стационарном положении в разделке с подачей сварочной проволоки перед дугой и воздействии дополнительной газовой струи на хвостовую часть сварочной ванны (рис. 2).



**Рис.2. Схема процесса сварки специальной горелкой (а) и расположения сил в сварочной ванне (б):**

1 – неплавящийся вольфрамовый электрод; 2 – сопло для подачи управляющей струи газа; 3 – многослойная сетка; 4 – сопло защитного газа; 5 – свариваемые детали

Дуга, воздействуя на поверхность сварочной ванны, создаёт в расплавленном металле силу  $P_d$ , которая перемещает жидкий металл из передней части ванны в её хвостовую часть вдоль объёмно-криволинейной поверхности фронта кристаллизации [6] с оттеснением металла на кромки щелевой разделки, образуя вогнутую форму поверхности формирующегося сварного шва. Движение потока жидкого металла из хвостовой части в центральную зону ванны осуществляется вдоль поверхности ванны [6]. При воздействии на хвостовую часть сварочной ванны управляющей газовой струёй создаются в расплавленном металле силы  $P_г$ ,  $P_м$ , соответственно от давления струи и составляющей веса жидкого металла, способствующие нежелательному увеличению толщины жидкой прослойки под дугой. Сохранение постоянства толщины этой прослойки возможно в случае равенства этих сил, т. е.  $P_d = P_г + P_м$ . Выполнение этого условия, по-видимому, возможно при направлении определенной величины газового потока через сопло диаметром  $d$ , расположенным на расстоянии  $L$  от оси электрода, в хвостовую часть сварочной ванны (рис. 2).

Рабочие параметры газоструйного потока можно представить как стационарный адиабатический поток с установившимся течением по трубе (сопло 2, рис. 2) и со свободным истечением струи («утопленная струя») [5]. Без учёта теплообмена с внешней средой основными параметрами, описывающими состояние струи в каждом её сечении, будут усреднённые значения плотности газа  $\rho$ , скорости потока  $\omega_1$  и площади его поперечного сечения  $F$ . Согласно условию неразрывности струи, при постоянном расходе газа  $G$  для сечений 1 и 2 (сечение потока на срезе и пятне нагрева соответственно).

$$G = \rho_1 \cdot \omega_1 \cdot F_1 = \rho_2 \cdot \omega_2 \cdot F_2, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – усреднённые значения плотности газа управляющего газового потока соответственно в поперечных сечениях 1 и 2;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – скорости газа управляющего газового потока соответственно в поперечных сечениях 1 и 2;  $F_1$  и  $F_2$  – площади поперечного сечения управляющего газового потока соответственно в поперечных сечениях 1 и 2.

При свободном истечении из сопла диаметр струи на расстоянии от среза сопла до пятна давления на поверхности сварочной ванны несколько расширяется. При этом пятно давления увеличивается:

$$F_2 = \kappa \cdot F_1, \quad (2)$$

где  $\kappa$  – коэффициент зависящий от диаметра сопла и длины струи. Например при диаметре сопла 2 мм ( $F_1 = 3,14 \text{ мм}^2$ ) пятно давления от струи длиной 5 – 6 мм, согласно результатам эксперимента, около  $7 \text{ мм}^2$ . Тогда  $F_2 = 2,2 \cdot F_1$ .

Известно [5], что полный импульс потока  $Y$  представляет собой сумму секундного количества движения и силы давления газа:

$$Y = G \cdot \omega + p \cdot F, \quad (3)$$

где  $Y$  – полный импульс управляющего газового потока;  $G$  – расход газа управляющего газового потока;  $\omega$  – скорость потока газа;  $p$  – давление потока газа.

Если принять значение  $Y_1$  на срезе сопла равным значению  $Y_2$  на пятне давления, тогда:

$$G_1 \cdot \omega_1 + p_1 \cdot F_1 = G_2 \cdot \omega_2 + p_2 \cdot F_2, \quad (4)$$

где  $\omega_2$  – скорость потока в пятне давления;  $p_2$  – давление потока газа на жидкий металл ванны–управляемый параметр, регулирующий толщину жидкой прослойки под дугой.

Приняв  $\omega_2 = 0$  и подставив выражение  $\omega_1$  из равенства (1), получим:

$$p_2 = \frac{G_1^2 + p_1 \cdot F_1}{\kappa \cdot F_1}. \quad (5)$$

Поскольку параметры  $F_1$  и  $p_1$  по условию величины постоянные, можно записать функциональную зависимость давления от расхода газа следующим образом:

$$p_2 = \kappa \cdot G_1^2 + c. \quad (6)$$

При отсутствии дополнительного потока ( $G_1 = 0$ ) процесс переходит из газодинамического в газостатический и коэффициент  $c$  отражает зависимость давления газа от изменения его объемного параметра ( $F \cdot \Delta l$ ).

Экспериментальные исследования влияния основных параметров режима сварки по щелевому зазору на толщину жидкой прослойки под дугой  $\sigma_{ж}$  и глубину проплавления  $h_{прс}$  проводили на макрошлифах по схеме, приведенной на рис. 3.

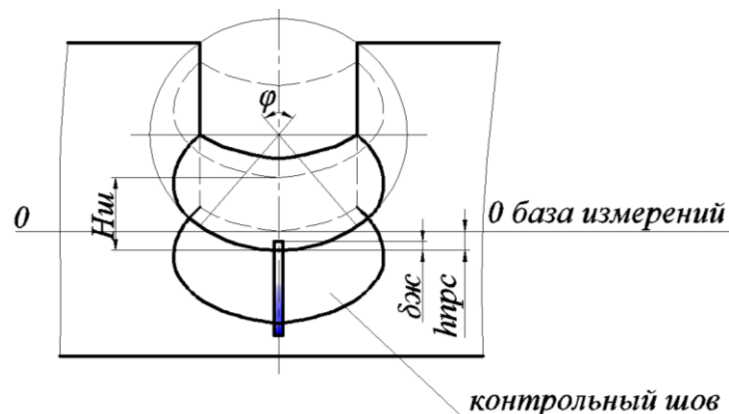


Рис.3. Схема измерения толщины жидкой прослойки  $\sigma_{ж}$  и глубины проплавления  $h_{прс}$

Эксперименты по автоматической сварке в щелевую разделку шириной 8 мм производили на трубных образцах из стали 30ХГСА диаметром 113 мм с толщиной стенки 18 мм. Предварительно на каждом образце наплавляли контрольные слои швов с применением при-

садочной проволоки Св.20Х2ГСНВМ-ВИØ 1,6 мм. По центру наплавленного слоя насверливали отверстия Ø1 мм и вставляли танталовый зонд с таким расчётом, чтобы при сварке следующего слоя происходило его оплавление.

Толщину жидкой прослойки под дугой определяли по нерасплавленному погружённому в жидкий металл концу зонда. Глубину проплавления шва определяли по расстоянию между поверхностью предыдущего (контрольного) слоя шва и зоной проплавления следующего слоя шва. Параметры режима изменяли в следующих пределах: сварочный ток  $J_{св} = 150 \dots 600$  А, скорость сварки  $V_{св} = 4 \dots 15$  м/ч, скорость подачи присадочной проволоки  $V_{п.п} = 4 \dots 50$  м/ч (без участия управляющей газовой струи). При обработке экспериментальных данных установлено, что наибольшее влияние на глубину проплавления оказывает сварочный ток (рис. 4). Максимальная глубина проплавления слоя шва составила 3,5...4,0 мм. При этом появление несплавлений не исключалось.

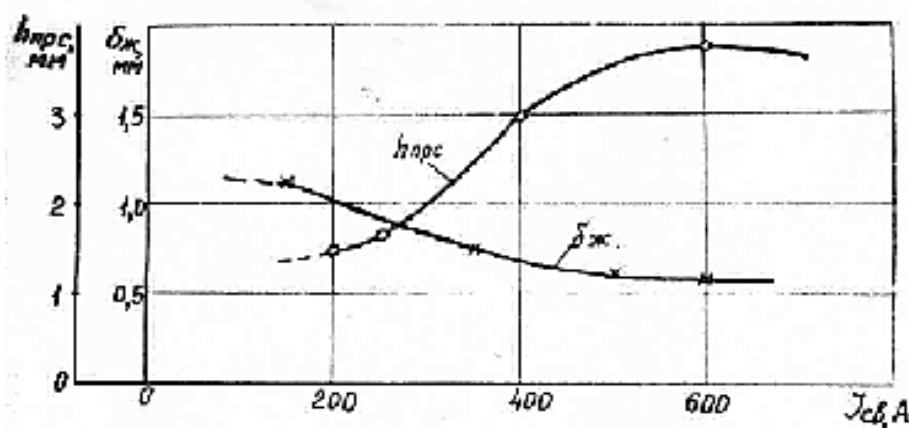


Рис.4 . Зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{прс}$  и толщины жидкой прослойки под дугой  $\sigma_{ж}$  от сварочного тока  $J_{св}$  при  $V_{св} = 5$  м/ч,  $V_{п.п.} = 6$  м/ч

Наиболее качественное формирование сварного шва получали при значениях сварочного тока  $J_{св} < 250$  А при глубине проплавления слоя шва  $h_{прс} = 1,2 \dots 1,5$  мм.

При образовании толстого слоя жидкого металла под дугой затрудняется передача тепла дуги поверхности предыдущего слоя и вероятность появления межслойных несплавлений увеличивается. В этой связи следовало установить зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{прс}$  и толщины жидкой прослойки под дугой  $\sigma_{ж}$  при сварке многослойного шва при обработке полученных экспериментальных данных (рис. 5).

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

Стабильное формирование слоёв шва в виде вогнутого мениска получали при значениях  $h_{прс} = 1,2 \dots 1,5$  мм при  $\sigma_{ж} = 0,5 \dots 1,0$  мм.

В качестве варьирующих факторов выбирали параметры режима из условия формирования слоёв сварного шва с вогнутой поверхностью, значения которых приведены в табл. 1, 2. Обработку экспериментальных данных и построение математической модели зависимости влияния диаметра дополнительного управляющего сопла  $d$ , расстояния между неплавящимся электродом и дополнительным управляющим соплом  $L$  и давления дополнительной управляющей газовой струи  $P_{ст}$  на глубину проплавления предыдущих слоёв сварного шва  $h_{прс}$ , толщину слоёв многослойного сварного шва, на глубину проплавления кро-

мок щелевой разделки и, соответственно, ширины сварного шва, а также формы вогнутого мениска выполняли с помощью метода построения парных зависимостей. Глубину проплавления предыдущих слоёв сварного шва определяли при исследовании также на поперечных макрошлифах (рис. 6).

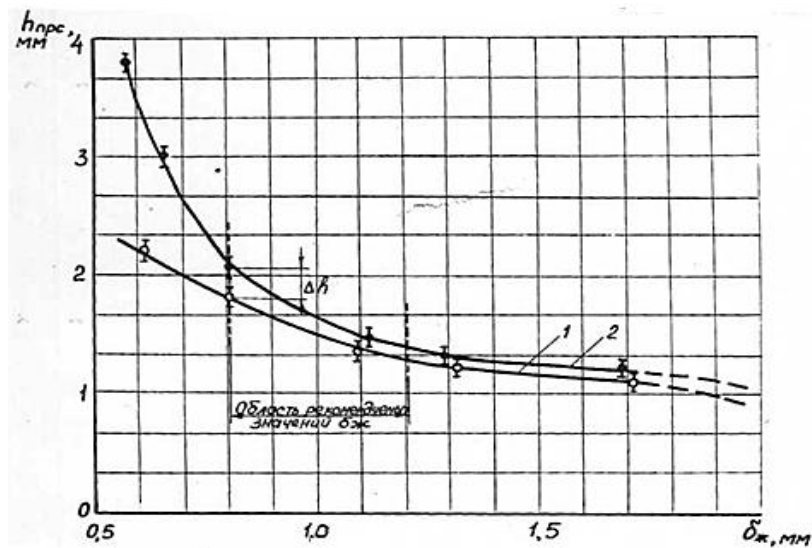
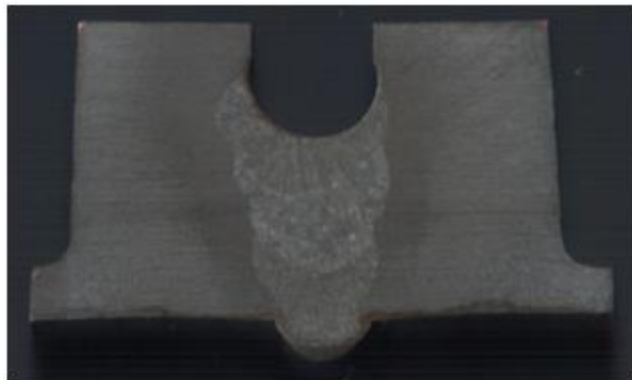
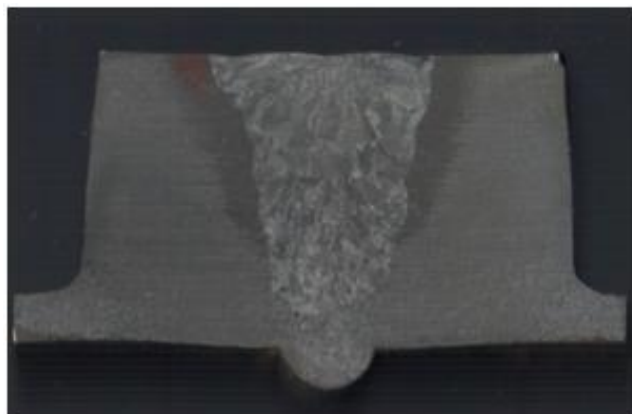


Рис.5. Зависимость глубины проплавления слоя шва  $h_{прс}$  от толщины жидкой прослойки  $\sigma_{ж}$  :

1 – минимальные; 2 – максимальные значения  $h_{прс}$



а)



б)

Рис. 6. Макрошлифы швов сварных соединений:

а – заполняющих слоев шва; б – после выполнения облицовочного слоя шва

Образование мениска (вогнутости) поверхности слоя шва при сварке по щелевому зазору возможно при условии проявления эффекта капиллярности, при этом ширина шва не должна превышать своего критического значения и при определённых значениях глубины проплавления кромок и слоя шва.

$$B < B_{кр}; B = B_{кр} = B_{щ} + 2 \cdot H_{пр}, \tag{7}$$

где  $B$  – ширина шва;  $B_{кр}$  – критическая ширина слоя шва;  $B_{щ}$  – ширина щелевого зазора;  $H_{пр}$  – глубина проплавления кромок.

Заданную высоту расплавления кромок  $H_{сл}$  определяют из соотношения:

$$n \cdot F_3 \cdot V_{п.п} / V_{св} \cdot B_{щ} < H_{сл} < n \cdot F_3 \cdot V_{п.п} / V_{св} \cdot B_{щ} + m \cdot a_k, \tag{8}$$

где  $H_{сл}$  – заданная высота расплавления кромок;  $F_3$  – площадь сечения присадочной проволоки;  $V_{п.п}$  – скорость подачи присадочной проволоки;  $V_{св}$  – скорость сварки;  $B_{щ}$  – ширина щелевого зазора;  $m, n$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от формы разделки кромок (принимается  $m=0,7$  и  $n=1,2$ );  $a_k$  – капиллярная постоянная свариваемого металла (принимается  $a_k = 2$  мм).

Таблица 1

Основные факторы и уровни их варьирования для построения зависимости

$$H_{пр} = F(I_{св}, d, P_{ст}) \text{ при } L = 3 \text{ мм}$$

№ образцов	Уровень варьирования	$I_{св}$ , А (X1)	$d$ , мм (X2)	$P_{ст}$ , Па (X3)
2, 4, 6	Основной (интервал варьирования)	215 ± 35	3 ± 1	1,1 ± 0,66
	Верхний	250	4	1,76
	Нижний	180	2	0,44

Таблица 2

Основные факторы и уровни их варьирования для построения зависимости

$$H_{пр1} = F(I_{св}, L, P_{ст}) \text{ при } d = 3 \text{ мм}$$

№ образцов	Уровень варьирования	$I_{св}$ , А (X1)	$L$ , мм (X2)	$P_{ст}$ , Па (X3)
1, 3, 5	Основной (интервал варьирования)	225 ± 45	5 ± 2	0,64 ± 0,21
	Верхний	270	7	0,85
	Нижний	180	3	0,43

Таблица 3

Значения параметров  $H_{пр}$  и  $H_{пр1}$

$I_{св}$ , А	$d$ , мм	$P_{ст}$ , Па	Расчетные данные	Экспериментальные данные	$I_{св}$ , А	$L$ , мм	$P_{ст}$ , Па	Расчетные данные	Экспериментальные данные
			$H_{пр}$ , мм (Y1)	$H_{пр}$ , мм				$H_{пр1}$ , мм (Y1)	$H_{пр1}$ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
180	2	0,425	0,75	0,839	180	3	0,425	0,51	0,603

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
190	2,3	0,615	1,03	1,031	193	3,6	0,485	0,58	0,709
200	2,6	0,805	1,31	1,158	206	4,2	0,545	0,76	0,785
210	2,9	0,995	1,58	1,559	219	4,8	0,605	1,34	1,054
220	3,2	1,185	1,86	1,735	232	5,4	0,665	1,92	2,09
230	3,5	1,375	2,13	2,235	245	6,0	0,725	2,5	2,479
240	3,8	1,565	2,41	2,235	258	6,6	0,785	3,08	3,093
250	4,0	1,755	2,66	2,479	271	7,0	0,845	3,55	3,644

Расчётные значения  $H_{пр}$ ( $Y1$ ) и  $H_{пр1}$ ( $Y2$ ) определялись из уравнений 9 и 10:

$$Y1 = 1,71 + 0,16 \cdot X1 + 0,266 \cdot X2 + 0,52 \cdot X3 \quad (9)$$

$$Y2 = 1,35 + 0,223 \cdot X1 + 0,395 \cdot X2 + 0,634 \cdot X3 \quad (10)$$

На основании обработки полученных данных и построенных графиков (рис. 7) видно, что воздействие дополнительной управляющей газовой струи способствует увеличению глубины проплавления, толщины и ширины слоёв многослойного сварного шва.

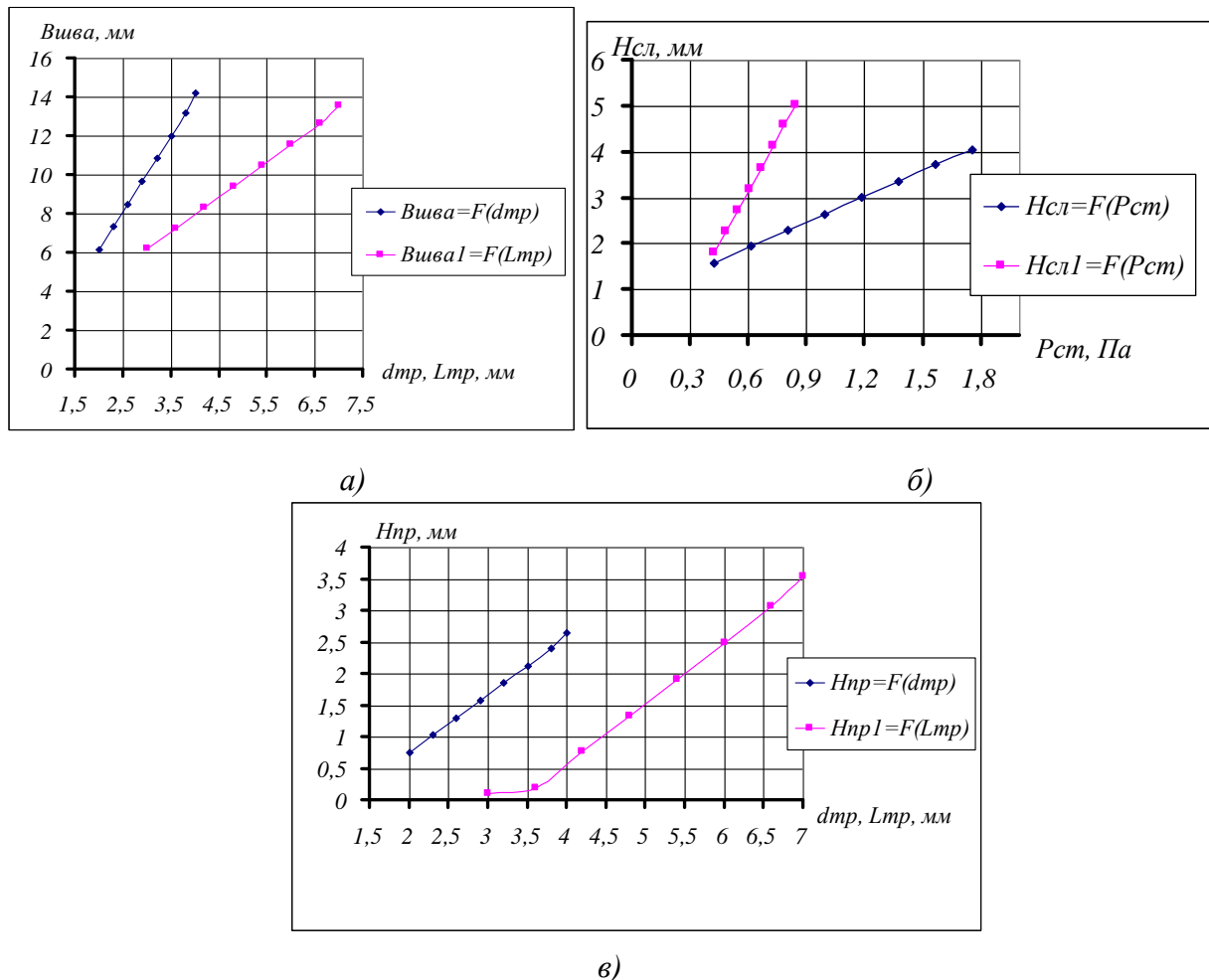


Рис. 7. Зависимость размеров сварного шва (ширины шва  $B_{шва}$  и глубины проплавления  $H_{пр}$ )

от диаметра от интенсивности воздействия управляющей дополнительной газовой струи:

а, в – соответственно ширины шва  $B_{шва}$  и глубины проплавления от диаметра сопла  $d$  и расстояния между неплавящимся электродом и дополнительным управляющим соплом  $L$ ;

б – толщины слоя шва от давления газовой струи  $P_{ст}$

Дополнительный управляющий газовый поток образует газовую заслонку в виде воронки в жидком металле сварочной ванны и тем самым препятствует движению потока жидкого металла из хвостовой части в центральную зону ванны и в зону сварочной дуги вдоль поверхности ванны, вытесняя жидкий металл на края щелевой разделки и приподнимает его на кромки, способствуя образованию мениска. Создавая газовую заслонку движению и попаданию жидкого металла под сварочную дугу, дополнительный газовый поток способствует, тем самым, уменьшению толщины жидкой прослойки под дугой и повышению влияния сварочной дуги на увеличение глубины проплавления основного металла и толщина слоя шва (рис. 7, б).

С увеличением диаметра дополнительного газового сопла увеличивается диаметр управляющей газовой струи, следовательно, и площади, на которую он воздействует. При сохранении давления газовой струи (увеличении расхода при увеличении диаметра управляющего сопла) газовая струя образует воздушную заслонку (воронку в жидком металле сварочной ванны) большего диаметра, тем самым, увеличивая влияние сварочного тока на глубину проплавления.

Увеличение эффекта воздействия дополнительного газового потока на ширину многослойного сварного шва при увеличении диаметра  $d$  в сравнении с увеличением расстояния  $L$  (рис. 7, а) связано с поднятием большего объёма жидкого металла газовой струей на кромки щелевой разделки и дополнительным оплавлением их за счет тепла жидкого металла.

С увеличением расстояния между сварочной дугой и дополнительной управляющей газовой струей увеличивается степень переохлаждения жидкого металла, происходит уменьшение температуры жидкого металла хвостовой части сварочной ванны, увеличение вязкости и уменьшение объёма жидкого металла на кромках щелевой разделки, соответственно, меньшим оплавлением их за счёт снижения тепла жидкого металла. Также в промежутке между сварочной дугой и газовой заслонкой при увеличении расстояния, увеличивается объём жидкого металла и происходит повышение толщины слоя сварного шва (рис. 7, б).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что дополнительная газовая струя оказывает наибольшее влияние на размеры сварного шва и является наиболее эффективным средством управления формой сварного шва. При управляющем воздействии газовой струи уменьшается толщина жидкой прослойки под дугой, увеличивается глубина проплавления и снижается вероятность появления несплавлений.

#### Библиографический список

1. Штрикман, М.М. Определение оптимальной глубины проплавления при сварке по щелевому зазору с поперечными колебаниями дуги / М.М. Штрикман, А.С. Павлов // Сварочное производство. – 1983. – №3. – С. 26–28.
2. Штрикман, М.М. Кристаллизация шва при сварке по щелевому зазору с поперечными колебаниями электрода / М.М. Штрикман, А.С. Павлов // Автоматическая сварка. – 1983. – №6. – С. 56–58.
3. А.с.1323288 СССР. Способ дуговой сварки в защитных газах в узкую разделку с поперечными колебаниями электрода / М.М. Штрикман, А.С. Павлов, В.А. Колчин. 1987. БИ №26.
4. А.с.1480994 СССР. Способ дуговой сварки в защитных газах в узкую разделку с поперечными колебаниями неплавящимся электродом / А.С. Павлов, М.М. Штрикман. 1988. БИ №19.
5. Штрикман, М.М. Дуговая сварка с воздействием на сварочную ванну направленных газоструйных потоков / М.М. Штрикман, А.С. Павлов, А.Н. Сабанцев, В.Н. Егоров // Сварочное производство. – 1999. – №12. – С. 3–6.



6. Демянцевич, В.П. Особенности движения жидкого металла в сварочной ванне при сварке неплавящимся электродом / В.П. Демянцевич, В.И. Матюхин // Сварочное производство.- 1972. – №10. – С. 1–3.

*Дата поступления  
в редакцию 15.04. 2016*

**A.C. Pavlov<sup>1</sup>, N.M. Vanushkin<sup>2</sup>**

### **MULTILAYER WELD FORMATION WITH DIRECTIONAL GAS JET BY WELDING IN THE SLOTTED EDGE PREPARATION**

The Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeyev <sup>1</sup>,  
Joint-stock company Kovytkino electromechanical plant<sup>2</sup>

**Purpose:** To study the possibility of obtaining the quality welded joint of thick-walled pipes with the slotted edge preparation by the new process providing the multilayer weld formation weld necessary form.

**Approach:** An experimental study of the process of obtaining the quality welded joint with the slotted edge preparation using automatic argon-arc welding with additional directional gas jet has been performed.

**Findings:** The welding torch for this welding method has been developed. Processing of the experimental results by means of metallographic studies has been carried out also mathematical models based on relation between size weld and the parameters of the welding method have been made.

**Research implications:** This study has shown the influence the main parameters of the welding conditions as well as changes of size and positions of the gas nozzle on the layer formation of the joint.

**Value:** The proposed welding method provides obtaining of higher quality indicators of welded joint and is easier to implement than current welding methods.

*Key words:* slit edge preparation, directional gas nozzle, depth of penetration, thickness of interlayer liquid metal, automatic welding in shielding gases.