

# РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НАПЛАВКИ ПРИСТЕНОЧНОГО ВАЛИКА ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

М. А. ШОЛОХОВ, Д. С. БУЗОРИНА

ООО «Шторм». РФ. г. Верхняя Пышма, ул. Бажова, 28. E-mail: ekb@shtorm

Эффективным способом повышения производительности процесса сварки при одновременном снижении материальных и энергетических затрат является применение зауженных разделок. Одной из основных трудностей при реализации технологии многопроходной сварки металлоконструкций из проката толщиной более 10 мм на автоматических и роботизированных установках является высокая вероятность возникновения дефектов, таких как несплавления, особенно при наложении первого в слое (пристеночного) валика. Одним из способов регулирования проплавления является управление параметрами процесса сварки, определяющими тепловложение. Экспериментально установлены зависимости между параметрами сварки в проблемных участках разделки и величиной проплавления. На их основе получены уравнения для определения параметров режима наплавки валика при заданном коэффициенте площадей. Результаты послужили составной частью создания алгоритмов управления параметрами режима сварки в автоматических и роботизированных установках. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 6.

*Ключевые слова:* механизированная сварка плавящимся электродом, полный тепловой КПД процесса сварки, полнофакторный эксперимент, коэффициент площадей, математическое моделирование, определение параметров режима сварки

В условиях современного сварочного производства остается актуальным вопрос повышения производительности процесса сварки. Одним из эффективных способов, позволяющих значительно повысить производительность процесса сварки, а также снизить материальные и энергетические затраты, является применение зауженных разделок [1]. Наряду с этим повышение производительности требует внедрения автоматических и роботизированных комплексов. Однако при реализации технологии многопроходной сварки плавящимся электродом на автоматических и роботизированных установках возникают сложности, связанные с появлением таких дефектов, как несплавления. Особенно при наложении пристеночного валика (первого валика в слое) [2], поскольку для получения сварных швов с требуемыми механическими свойствами, благоприятной структурой, минимальными сварочными деформациями и требуемой формой швов, а также снижения вероятности появления горячих и холодных трещин [3] необходимо ограничивать погонную энергию. В условиях ограничения погонной энергии при многопроходной сварке из-за повышенного теплоотвода в основной металл вероятность образования несплавлений между валиком и кромками разделки, а также между соседними валиками существенно возрастает.

Одним из способов регулирования проплавления основного металла при сварке в проблемных

участках разделки является изменение параметров процесса (ток, напряжение, скорость сварки), определяющих тепловложение, а следовательно, условия формирования сварного шва, в частности глубину проплавления кромок [4, 5].

В работе [6] приведены результаты исследования влияния параметров режима сварки (сварочного тока обратной полярности, напряжения дуги, скорости сварки, расстояния между концом электрода и кромкой) на форму пристеночного валика при сварке под флюсом. Определено, что параметром, характеризующим механическое заклинивание шлаковой корки, является угол перехода поверхности пристеночного валика к кромке. Основные параметры режима, определяющие его значение: напряжение на дуге, расстояние между концом электрода и кромкой, а также скорость сварки. Однако в данной работе не рассмотрены вопросы влияния угла разделки на вероятность возникновения несплавлений у кромок разделки.

Известен также метод, когда для предотвращения появления несплавлений между валиком и кромкой разделки применяют автоматическую сварку с поперечными колебаниями с импульсным увеличением тока при подходе к свариваемой кромке. Однако при этом необходимо определение точного значения мощности импульса (что связано с оценкой эффективности использования тепловой энергии дуги).

Таким образом, актуальными остаются вопросы определения влияния угла разделки на формирование валиков, оптимизации параметров раз-



делки, а также определения режимов наплавки пристеночного валика с заданным коэффициентом площадей  $k$ , равным отношению площади проплавления к площади наплавки  $F_{пр}/F_n$ , который гарантирует отсутствие несплавлений.

Цель настоящей работы — установление зависимостей между параметрами наплавки пристеночного валика при многопроходной механизированной сварке в защитных газах и величиной проплавления, а также определение на основе полученных зависимостей режимов наплавки пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах с заданным коэффициентом площадей.

Эффективное управление процессом проплавления свариваемого металла в условиях дуговой сварки возможно лишь при знании основных закономерностей этого процесса, а также качественного и количественного влияния параметров режима сварки на размеры и форму зоны проплавления. В основу большинства математических моделей, создаваемых для целей управления сварочными процессами, заложены статистически выявляемые зависимости между энергетическими параметрами режима сварки (сварочный ток, напряжение на дуге, скорость сварки и т.д.), с одной стороны, и параметрами, характеризующими качество сварного соединения, с другой. К параметрам, определяющим геометрию шва и качество сварного соединения, относятся также глубина проплавления свариваемого металла и площадь сечения сварного шва [7, 8]. Эффективность использования тепловой энергии дуги на образование сварного соединения оценивают с помощью полного теплового КПД процесса сварки  $\eta_{св}$ , который определяет отношение условного теплосодержания расплавляемого за единицу времени металла шва к тепловой мощности сварочного источника нагрева [5]:

$$\eta_{св} = \frac{v_{св} F_{ш} \gamma_M H_{пл}}{Q} = \frac{v_{св} (F_n + F_{пр}) \gamma_M H_{пл}}{Q} = \eta_n + \eta_{пр}, \quad (1)$$

где  $v_{св}$  — скорость сварки, м/с;  $F_{ш}$  — площадь поперечного сечения шва, м<sup>2</sup>;  $F_n$  — площадь сечения наплавленного металла, м<sup>2</sup>;  $F_{пр}$  — площадь проплавления основного металла, м<sup>2</sup>;  $\gamma_M$  — удельная плотность металла, кг/м<sup>3</sup>, для низкоуглеродистой стали она равна 7850 кг/м<sup>3</sup>;  $H_{пл}$  — энтальпия при температуре плавления с учетом открытой теплоты плавления, Дж/кг, для низколегированной стали принимают  $H_{пл} = 1340$  Дж/г [5];  $Q = IU$  — тепловая мощность сварочного источника нагрева, Дж/с;  $\eta_n$ ,  $\eta_{пр}$  — полный тепловой

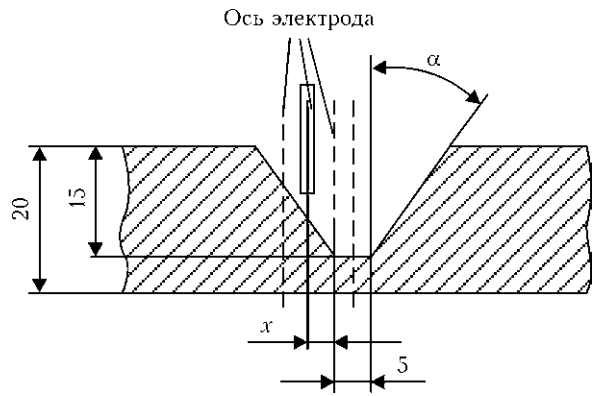


Рис. 1. Схема наложения валиков

КПД процесса наплавки и проплавления основного металла [9].

**Методика проведения экспериментов.** В настоящей работе для оценки зависимости формирования пристеночного валика от геометрии разделки и положения электрода в ней исследовано влияние технологических параметров (угла разделки  $\alpha$ , положения электрода в разделке — расстояние между концом электрода и кромкой — координата  $x$ , а также скорости сварки  $v_{св}$ ) на площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки при механизированной сварке в защитных газах при условии качественного формирования пристеночного валика.

Сварку производили путем наложения валиков в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. При этом использовали образцы из стали 09Г2С, которые представляют собой пластины размерами 200×500×20 мм, имитирующие сварное соединение с разделкой кромок 15, 25, 35° и притуплением 5 мм, аналогичным выполненному корневому проходу.

Установка для проведения экспериментов (рис. 2) состояла из стола с токоподводом, механизма перемещения горелки Noboruder NB-5H, сварочного аппарата S5 Pulse ШТОРМ-LORCH. Параметры режима сварки регистрировали с помощью приборов, установленных на пульте управления аппарата.

Для сварки применяли сварочную проволоку марки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм по ГОСТ 2246—



Рис. 2. Общий вид установки для сварки

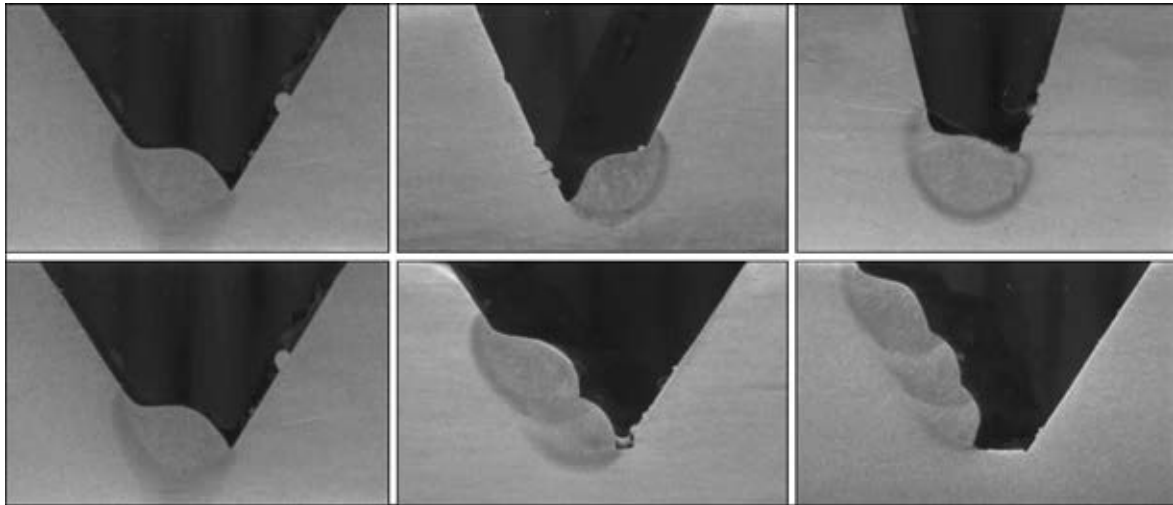


Рис. 3. Примеры макрошлифов образцов в нижнем положении

70, смесь защитных газов — аргон 82 %, углекислый газ 18 % по ТУ 2114-004-00204760–99.

Значения факторов изменяли в соответствии с планом полнофакторного эксперимента. Значения факторов приведены в табл. 1.

Фактор	Значения		
	-1	0	+1
Угол разделки $\alpha$ , град ( $x_1$ )	15	25	35
Расстояние от оси до электрода $x$ , мм ( $x_2$ )	0	1,5/2/4	2,5/4/7
Скорость сварки, м/ч ( $x_3$ )	18	24	30

Режим сварки подбирали таким образом, чтобы обеспечить удовлетворительное формирование шва:

сварочный ток $I_{св}$ , А	217±10
скорость подачи проволоки $v_{пл}$ , м/мин	6,3
напряжение на дуге $U_d$ , В	21,4±1
расход защитного газа, л/мин	18
диаметр электрода $d$ , мм	1,2
вылет электрода, мм	20±1

С помощью измерения изготовленных макрошлифов (рис. 3) сваренных образцов определили площади сечения валиков  $F_V$

$$F_V(\alpha, x, v_{св}) = 47,498 - 0,031\alpha + 4,205x - 0,956v_{св} - 0,113\alpha x + 0,003\alpha v_{св} - 0,143xv_{св} + 0,004\alpha xv_{св} \text{ (мм}^2\text{)}, \quad (2)$$

а также полный тепловой КПД процесса сварки

$$\eta_V(\alpha, x, v_{св}) = 0,1253 - 0,0055\alpha + 0,018x + 0,0239v_{св} + 0,00006\alpha^2 + 0,0006x^2 - 0,0005v_{св}^2 - 0,0005\alpha x + 0,00012\alpha v_{св} - 0,00013xv_{св}. \quad (3)$$

**Анализ результатов и их обобщение.** Анализ полученных зависимостей площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от скорости сварки показал, что при перемещении электрода по ширине разделки эти зависимости имеют сложный характер: при одних условиях

( $v_{св}$ ,  $\alpha$ ) при перемещении электрода к кромке значения площади сечения валика и КПД возрастают, а при других — убывают. Такая зависимость может быть объяснена взаимным влиянием геометрии разделки и параметров режима сварки, характеризующим положение электрода (дуги) относительно прослойки расплавленного металла. При повышении скорости сварки площадь сечения валика уменьшается, а полный тепловой КПД процесса сварки увеличивается только до определенного значения. Это может быть объяснено тем, что с возрастанием скорости сварки количество наплавляемого металла на единицу длины шва уменьшается [9]. Однако при этом с увеличением скорости сварки столб дуги начинает отклоняться в сторону, противоположную направлению сварки. Отклоняясь, столб дуги вытесняет часть жидкого металла в хвостовую часть ванны. Уменьшение толщины жидкой прослойки под дугой обуславливает увеличение глубины проплавления при повышении скорости сварки до определенного значения. При дальнейшем повышении скорости в связи с уменьшением погонной энергии глубина проплавления уменьшается.

Приведенные результаты хорошо согласуются с данными из работ [10, 11], из которых известно скорость движения жидкости в пленке возрастает по мере стекания ее на дно кратера, а толщина пленки сначала увеличивается, а потом уменьшается. Толщина пленки и особенно скорость движения металла в ней существенно зависят от параметров режима сварки (наплавки).

Кроме того, известно [12], что распределение удельной мощности теплового потока по поверхности разделки и сварочной ванны имеет сложный характер вследствие взаимодействия дуги с поверхностью сварочной ванны. При изменении режима сварки распределение теплового потока также изменяется существенно вследствие изменения формы поверхности сварочной ванны, также и позиционирования электрода в разделке,

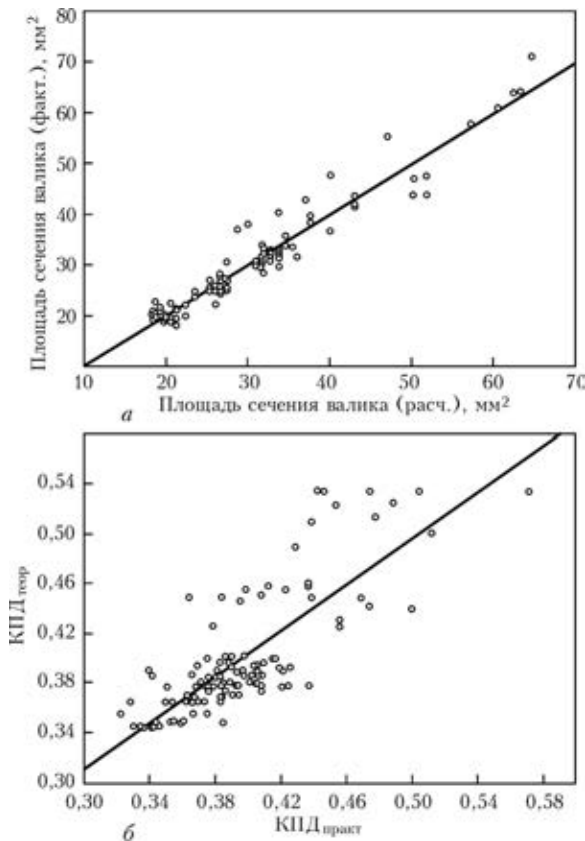


Рис. 4. Диаграммы рассеяния экспериментальных (кружки) и расчетных (сплошная линия) значений площади сечения валика (а) и теплового КПД (б) процесса сварки

поэтому наиболее полную картину о тепловом воздействии дуги при сварке по зазору можно определить только в ходе моделирования формирования сварочной ванны и проведения экспериментальных работ с учетом как формы разделки кромок, так и конкретного режима сварки.

На основе изложенного выше можно сделать очевидный вывод о взаимосвязанном влиянии параметров режима сварки и жидкой прослойки под дугой на формирование сварного шва. Следовательно, уравнения для определения площади сечения валика и теплового КПД должны это учитывать, в данном случае они представлены в мультипликативной форме и записаны в следующем виде:

$$F = F_V(\alpha, x, v_{св})\theta_F(I_{св}), \quad (4)$$

$$\eta_{св} = \eta_V(\alpha, x, v_{св})\theta_\eta(I_{св}), \quad (5)$$

где  $F_V(\alpha, x, v_{св})$ ,  $\eta_V(\alpha, x, v_{св})$  — функции зависимости площади сечения валика и теплового КПД соответственно от угла разделки  $\alpha$ , положения электрода в разделке  $x$ , скорости сварки  $v_{св}$ ;  $\theta_F(I_{св})$ ,  $\theta_\eta(I_{св})$  — функции зависимости площади сечения валика и теплового КПД соответственно от сварочного тока  $I_{св}$ .

Функции  $\theta_F(I_{св})$ ,  $\theta_\eta(I_{св})$  определены в ходе эксперимента:

$$\theta_F(I_{св}) = 0,0134I_{св} - 1,559, \quad (6)$$

$$\theta_\eta(I_{св}) = 0,0047I_{св} + 0,084. \quad (7)$$

Адекватность полученных уравнений (4), (5) оценивали по диаграммам рассеяния экспериментальных и расчетных значений площади сечения валика и теплового КПД процесса сварки (рис. 4).

Диаграммы рассеяния, приведенные на рис. 4, показывают удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных значений площади сечения валика и теплового КПД процесса сварки. Проверка адекватности полученных уравнений по  $F$ -критерию Фишера дала положительные результаты, что характеризует их правильность.

На основании экспериментальных и теоретических данных была решена задача (как обратная) по определению режимов сварки при заданных площади сечения валика и коэффициенте площадей  $k$ . Данные зависимости были определены и получены в следующем виде:

сварочный ток

$$I_{св} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (8)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определяют по следующим формулам:

$$a = -0,015 \frac{\pi d^2}{F_H}, \quad b = 0,637 + \frac{\pi d^2}{F_H}(3,341 - 0,01\alpha),$$

$$c = -74,048 + 0,048\alpha - \frac{\pi d^2}{F_H}(185,97 - 0,583\alpha) - (1 + k_{сн})F_H,$$

где  $k_{сн}$  — коэффициент сплавления при сварке плавящимся электродом, при используемых режимах он равен 0,18...4,0;

напряжение

$$U_{эф} = \frac{B_{эф} v_{п.п}}{\eta_{св} I_{св}}. \quad (9)$$

Коэффициент  $B_{эф}$  определяют по формуле

$$B_{эф} = \gamma_M H_{пл} \frac{1 + k_{сн}}{4} \pi d^2;$$

скорость сварки

$$v_{св} = \frac{\pi d^2(0,08I_{св} - 8,32)60}{4F_H} \text{ (м/ч)}. \quad (10)$$

Для проверки сходимости полученных закономерностей по данной работе и оценки сходимости результатов определения параметров сварки по полученным уравнениям (8)–(10) были выполнены эксперименты и на их основе построены

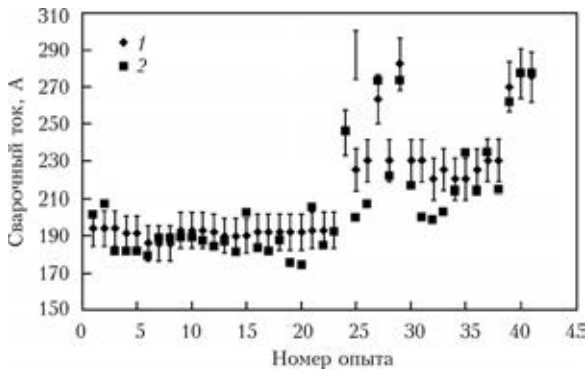


Рис. 5. График сходимости экспериментальных (1) и расчетных (2) значений сварочного тока (погрешность  $\pm 5\%$ )

график сходимости значений сварочного тока (рис. 5) и диаграмма рассеяния фактических и расчетных значений напряжения (рис. 6).

Как видно из рис. 5, 6, разброс значений не превышает 10...12 %, следовательно, данные уравнения для определения параметров режима наплавки пристеночного валика (также могут быть использованы для расчета параметров режима наплавки на наклонную поверхность) могут быть применены при разработке технологии многопроходной механизированной сварки в защитных газах.

## Выводы

1. Сформулированы и получены в аналитическом виде общие уравнения зависимости теплового КПД процесса сварки и площади сечения валика от технологических параметров сварки. Уравнения учитывают (в том числе кроме известных параметров) взаимное влияние положения электрода относительно жидкой ванны металла ( $F_{\nu}(\alpha, x, v_{\text{св}})$ ,  $\eta_{\nu}(\alpha, x, v_{\text{св}})$ ) и величину прослойки расплавленного металла под дугой ( $\theta_F(I_{\text{св}})$ ,  $\theta_{\eta}(I_{\text{св}})$ ).

2. Полученные уравнения позволяют рассчитывать параметры наплавки первого валика в слое, обеспечивающие заданный коэффициент площадей  $k = F_{\text{пр}}/F_{\text{н}}$  (в рассмотренных пределах  $k$  от 0,20 до 1,57), в результате чего снижается вероятность появления таких дефектов как несплавления.

3. Для приведенных параметров режима (см. с. 65) с помощью полученных уравнений определены оптимальные значения угла разделки  $\alpha = 20,3^\circ$  и скорости сварки  $v_{\text{св}} = 26,34$  м/ч при условии максимального значения полного теплового КПД процесса сварки  $\eta_{\text{св}} = 0,392$ . При данных значениях угла разделки и скорости сварки обеспечивается наиболее эффективный ввод тепла.

4. На основании результатов выполненной работы создана программа расчета режимов на-

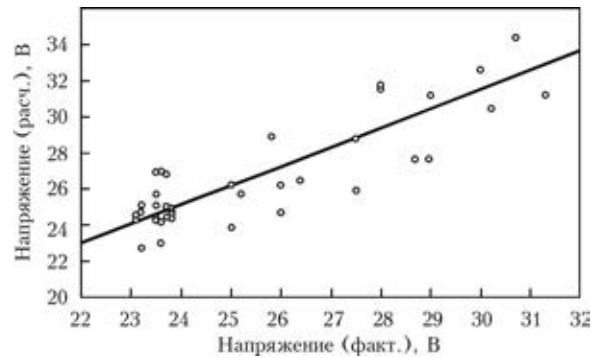


Рис. 6. Диаграмма рассеяния экспериментальных (кружки) и расчетных (сплошная кривая) значений напряжения

плавки пристеночного валика. В дальнейшем полученные аналитические зависимости могут быть использованы для создания алгоритмов управления параметрами режима сварки автоматических и роботизированных установок.

1. Рахматуллин Т. А., Шолохов М. А., Бузорина Д. С. Проблемы внедрения зауженных разделок при сварке корпусных конструкций специальной техники // Изв. вузов. Машиностроение. — 2012. — № 4. — С. 64–66.
2. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки: Т. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — 601 с.
3. Гончаров Н. С. Исследования и разработка технологии двухдуговой автоматической сварки в защитных газах корпусов из высокопрочных среднелегированных сталей. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2009.
4. Лебедев В. А. Управление проплавлением при механизированной сварке и наплавке // Свароч. пр-во. — 2011. — № 1. — С. 3–11.
5. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
6. Чернышов Г. Г., Панков В. В., Маркушевич И. С. Влияние параметров режима на формирование пристеночного валика при сварке в глубокую разделку // Свароч. пр-во. — 1984. — № 12. — С. 14–16.
7. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки: Т. 1. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. — 585 с.
8. Сас А. В., Гладков Э. А. Технологический процесс сварки как объект в АСУ // Изв. вузов. Машиностроение. — 1983. — № 8. — С. 144–146.
9. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / Под ред. В. М. Неровного. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 752 с.
10. Размышляев А. Д. Гидродинамические параметры пленки жидкого металла на передней стенке кратера ванны при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1982. — № 1. — С. 20–25.
11. Потаповский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
12. Распределение тепловой мощности дуги при сварке плавящимся электродом по узкому зазору / М. А. Шолохов, И. Э. Оськин, В. А. Ерофеев, С. И. Полосков // Сварка и диагностика. — 2012. — № 4. — С. 18–23.

Поступила в редакцию 03.06.2013