

УДК 621.791:004.942

Оценка вероятности возникновения дефектов формирования швов и расчет допусков на параметры процесса дуговой сварки по узкому зазору

М.А. Шолохов¹, В.А. Ерофеев², С.И. Полосков³

¹ ООО «ШТОРМ», 624093, Верхняя Пышма, Свердловская обл., Российская Федерация, Бажова ул., д. 28

² Тульский государственный университет, 300012, Тула, Российская Федерация, Ленина пр., д. 92

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Probability estimation of weld seam defect formation and calculation of tolerances for narrow gap arc welding parameters

M.A. Sholokhov¹, V.A. Erofeev², S.I. Poloskov³

¹ Storm LLC, 624093, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, Russian Federation, Bazhov St., Bldg. 28

² Tula State University, 300012, Tula, Russian Federation, Lenin Pr., Bldg. 92

³ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: shmihael@yandex.ru, va_erofeev@mail.ru, si_poloskov@mail.ru



Одним из способов повышения производительности дуговой сварки процессов является сварка плавящимся электродом по узкому зазору. Однако при реализации данной технологии часто сталкиваются с проблемой возникновения дефектов формирования швов: несплавления и непровары у кромок разделки. В связи с этим актуальным остается вопрос оценки возможных погрешностей параметров сварочного процесса, случайные отклонения которых могут приводить к возникновению подобных дефектов. Предложено оценивать вероятность возникновения дефектов формирования швов по отношению разности номинального и предельно-допустимого значений проплавления к его отклонению вследствие нестабильности параметров сварки с помощью функции Лапласа. Допуски на отклонения параметров сварки можно определить, решая обратную задачу по оценке вероятности возникновения дефектов. Полученные результаты согласуются с результатами экспериментального исследования влияния параметров режима многопроходной сварки на формирование отдельных слоев в узком зазоре и могут быть использованы при создании технологии сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, узкий зазор, дефекты формирования швов, параметры процесса сварки, вероятность возникновения дефектов.



One way to increase productivity is to use narrow gap MIG/MAG welding. However, when using such technology we often face problems of weld seam defect formation: lack of fusion and lack of penetration at edges. Due to this the question of estimating welding parameters possible inaccuracy, random deviation of which might cause such defects, is still relevant. We suggest estimating the probability of defect formation as a ratio of the remainder of the nominal and the threshold values of penetration to its deviation due to the instability of welding parameters, using Laplace's function. Tolerance on variations of welding parameters may be determined through solving an inverse problem of estimated probability of defect formation. The results obtained comply with the results of experimental studies of the

influence of multi pass welding parameters on the formation of separate layers in the narrow gap, and can be used to develop welding technology.

Keywords: arc welding, narrow gap, weld seam defects formation, welding parameters, probability of defects formation.

Сварка плавящимся электродом по узкому зазору обеспечивает существенное повышение производительности труда за счет уменьшения объема наплавляемого металла, что особенно важно при сварке узлов и деталей большой толщины [1]. Однако при использовании подобных разделок возникают проблемы обеспечения качества формирования шва, в частности возможно появление несплавлений у кромок и межслойных непроваров в зоне сопряжения межслойных поверхностей с металлом кромок, а также пустот (полостей) на боковых поверхностях шва. Известно [2, 3], что основными причинами их возникновения являются блуждание дуги в разделке и случайные отклонения параметров процесса сварки от номинального значения. При создании технологии необходимо учитывать возможные допуски на параметры сварочного процесса, выход за пределы которых может обусловить возникновение подобных дефектов [4].

Цель работы — оценка вероятности возникновения дефектов формирования швов и расчет допусков на параметры процесса дуговой сварки по узкому зазору.

Решение основных задач управления качеством основано на статистических методах, так как возникновение дефектов сварки в реальных условиях производства — случайное событие, вызванное непредвиденными отклонениями свойств материалов, характеристик оборудования и параметров процесса от нормы. От-

клонения параметров процесса определяются качеством оборудования и материалов и указываются в соответствующей документации. Некоторые отклонения являются допусками на размеры свариваемого стыка, другие — на пространственное расположение сварочного инструмента. Часть параметров может изменяться быстро, например, напряжение в питающей электросети, а часть — с малой скоростью, например, изменение расположения электрода в разделке при перемещении вдоль стыка.

Исследования влияния параметров дуговой сварки в узкую разделку [5] показали, что существуют две группы факторов (параметров режима), степень влияния которых на формирование шва оказывается различной. Первая группа факторов (напряжение и ток дуги, скорость сварки) существенным образом влияют на формирование шва. Вторая группа (диаметр и вылет электрода) оказывает значительно меньшее влияние на этот процесс. Отличия подобного рода обусловлены как различной природой физических величин, так и разным характером их влияния на процесс плавления металла и формирования шва в узком зазоре. Установлено, что на формирование шва сильное влияние оказывает ширина разделки.

Значения вероятных отклонений для дуговой сварки в углекислом газе плавящимся электродом в узкую разделку представлены в табл. 1.

Множество случайных комбинаций отклонений параметров сварки от нормы приводит

Таблица 1

Вероятные отклонения параметров дуговой сварки плавящимся электродом в узкую разделку для стали толщиной 40 мм

Параметр процесса	Номинальное значение параметра	Отклонение	
		абсолютное	относительное, %
Скорость подачи электрода v_f , мм/с	30–100	$\pm 1-5$	$\pm 4-6$
Скорость сварки v_w , мм/с	5–10	$\pm 0,5-1$	$\pm 4-6$
Напряжение питания дуги U , В	25–30	$\pm 2-3$	$\pm 5-10$
Диаметр электрода d_f , мм	1,6–2	$-0,05$	$-2-2,5$
Смещение электрода в стыке E , мм	0	± 10	—
Ширина стыка B , мм	5–10	$\pm 1-2$	$\pm 10-20$
Длина вылета L_f , мм	20–60	± 10	$\pm 10-50$

к нестабильности показателей качества формирования шва. Наиболее наглядно эта нестабильность проявляется на размерах поперечного сечения шва и возникновении характерных дефектов типа шлаковых включений и несплавлений между валиками в многопроходных швах. Обычно такие дефекты при сварке по узкому зазору возникают у кромок разделки. Кроме того, образование дефектов возможно и на границе сплавления валика с ранее выполненным слоем.

Основные группы дефектов формирования швов при сварке по узкому зазору:

- выпуклая поверхность слоя в разделке;
- несплавление между слоями;
- подрезы стенок разделки из-за стекания металла;
- подрез у одной кромки и несплавление у второй;

- несплавление слоя со стенками разделки;
- межслойный непровар.

Образование подобных дефектов обусловлено тем, что при формировании последующего слоя предыдущий слой проплавляется у границы разделки неравномерно, либо последующий слой не обеспечивает сплавление со стенкой разделки. Причиной дефектов формирования швов может быть и выпуклая поверхность слоя в разделке, препятствующая эффективному прогреву кромок и формированию последующих слоев. В то же время авторы работы [6] отмечают, что при сварке по узкому зазору возможно местное уменьшение толщины металла у границы шва из-за характерных подрезов, которые могут возникать как вследствие смачивания стенки разделки жидким металлом без подплавления кромок, так и стекания металла сварочной ванны с боковых стенок разделки. Подобные подрезы при сварке последующего прохода превращаются в несплавления или межслойные непровары. Однако вероятность их возникновения значительно меньше, чем несплавлений и непроваров. Учитывая причинно-следственную связь между схожими по характеру дефектами, главным критерием их возникновения можно считать сплавление наплавляемого металла с основным металлом. Поэтому для сварки в зауженную разделку показателями качества формирования является провар a на высоту H боковой поверхности разделки кромок и глубина провара ранее наплавленного слоя h , которые хорошо видны на макрошлифах сварных швов (рис. 1).

Основной дефект сварки в узкую разделку — межслойное несплавление D (рис. 1, a) обычно

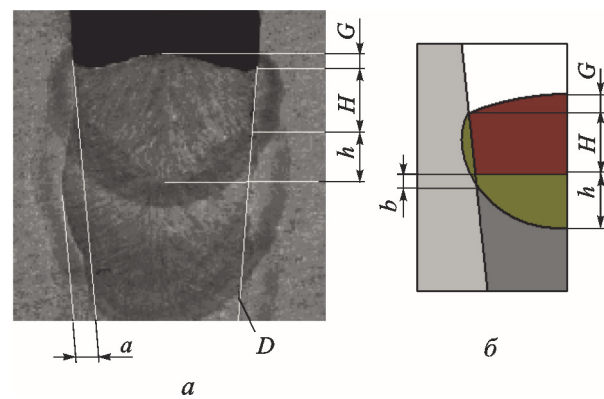


Рис. 1. Геометрические показатели качества формирования шва в узкой разделке:
 a — макрошлиф; b — схема определения размеров слоя проплавления при моделировании (полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

образуется у боковых поверхностей кромок разделки и поэтому называется несплавление у кромок. Несплавление у кромок, как правило, возникает при выпуклой поверхности слоя, поэтому высота выпуклости G является дополнительным критерием формирования слоя в узкой разделке кромок. Такое несплавление может быть следствием межслойного непровара при наложении предыдущего слоя. Поэтому критерием качества формирования был принят размер b (рис. 1, b), характеризующий как возможное несплавление, так и непровар. Условиями качественного формирования являются: $a > 0$, $G < 0$, $b > 0$, $H = H_0$, $h > 0$ (H_0 — заданная высота наплавки). Вероятность удовлетворения этим условиям зависит как от номинальных значений перечисленных критериев, так и от их рассеяния.

Проведенный анализ условий возникновения дефектов показал, что процесс сварки в узкий зазор отличается от других способов многопроходной сварки высокой чувствительностью даже к незначительному изменению параметров режима сварки. Поэтому задача оценки стабильности сварки сводится к расчету дисперсии S_Y значений показателей Y качества сварки по заданным дисперсиям S_X параметров X сварочного процесса [7]. При малых отклонениях параметров проплавления их допустимо считать пропорциональными. Коэффициент пропорциональности можно определить экспериментально, но из-за большой трудоемкости и недостаточной точности измерений при сварке лучше использовать теоретические исследования.

Наиболее эффективны методы, основанные на численном моделировании формирования

сварочной ванны и шва. При анализе влияния отклонений вначале определяют значения X_0 параметров, при которых формируется соединение с удовлетворительными значениями показателей качества. Затем выполняют имитацию, варьируя значения каждого из параметров на значение $\pm\Delta x \approx S_x$. При этом значения показателей качества отклоняются от номинального на величину $\Delta y \approx S_y$. Оценка рассеяния размеров шва позволяет обосновать требования к точности параметров оборудования, стабильности свойств материалов, определить допуски на параметры, выявить полезность использования систем автоматического управления и стабилизации и т. п.

Данная методика была применена для анализа стабильности процесса дуговой сварки электродной проволокой Св-10ГСМТ диаметром 2,0 мм в зауженную разделку кромок шириной 5 мм для стали 20ХГСНМ толщиной 24 мм. Защитный газ — 100 % CO₂. При анализе была использована физико-математическая модель процесса сварки плавящимся электродом по узкому зазору, подробно описанная в работах [1, 8].

Отклонения размеров наплавленного валика в зауженной разделке кромок, обусловленные отклонениями параметров дуговой сварки представлены в табл. 2.

Вероятность возникновения межслойных несплавлений можно оценить по отношению разности номинального и предельно-допустимого значений проплавления к его отклонению вследствие нестабильности параметров сварки с помощью функции Лапласа [9, 10].

При допущении, что отклонения, вызываемые нестабильностью отдельных параметров, малы, независимы и распределены по нормальному закону, суммарное отклонение S_Y показателей качества можно определить по формуле

$$S_Y = \sqrt{\sum_{X=1}^m S_{Y,X}^2}, \quad (1)$$

где X — параметр процесса; m — число параметров процесса; $S_{Y,X}$ — отклонение Y , вызванное отклонением X .

Рассеяние размеров шва удобно рассматривать относительно их номинального значения S_Y/Y_0 . Вероятность того, что размер шва Y не выйдет за допустимые пределы $[Y_{D1}, Y_{D2}]$, можно определить из условия

$$p_Y = \Phi\left(\frac{Y_0 - Y_{D1}}{S_Y}\right) + \Phi\left(\frac{Y_0 - Y_{D2}}{S_Y}\right). \quad (2)$$

Здесь $\Phi(\cdot)$ — функция Лапласа.

В данном случае размеры наплавленного слоя ограничены с одной стороны $Y > 0$, что позволяет оценить вероятность p_Y^D некачественного формирования следующей зависимостью:

$$p_Y^D = 0,5 - \Phi(Y_0/S_Y). \quad (3)$$

Результаты оценки вероятности некачественного формирования шва для данного случая сварки в узкую разделку, приведенные в табл. 2, подтверждают, что при сварке в узкую разделку наиболее вероятным дефектом явля-

Таблица 2

Отклонения размеров наплавляющего валика в узкой разделке кромок, обусловленные отклонениями параметров дуговой сварки

Значение параметра $X \pm \Delta x$	Отклонение размеров шва Δy , мм			
	$G \pm \Delta G$	$h \pm \Delta h$	$H \pm \Delta H$	$b \pm \Delta b$
Скорость подачи электрода $v_f = (40 \pm 5)$ мм/с	-0,6±0,21	2±0,22	2,5±0,31	0,45±0,07
Скорость сварки $v_w = (10 \pm 1)$ мм/с	-0,6±0,08	2±0,15	2,5±0,25	0,45±0,12
Напряжение питания дуги $U = (22 \pm 2)$ В	-0,6±0,12	2±0,24	2,5±0,12	0,45±0,18
Диаметр электрода $\Delta d_f = \pm 0,05$ мм	-0,6±0,02	2±0,05	2,5±0,25	0,45±0,04
Смещение электрода в стыке $E = 0,5$ мм	-0,6±0,1	2±0,01	2,5±0,10	0,45±0,32
Ширина стыка $\Delta B = \pm 0,6$ мм	-0,6±0,07	2±0,02	2,5±0,25	0,45±0,29
Длина вылета $\Delta L_f = \pm 10$ мм	-0,6±0,03	2±0,07	2,5±0,01	0,45±0,07
Суммарное отклонение S_Y	-0,6±0,28	2±0,36	2,5±0,55	0,45±0,48
Суммарное относительное отклонение S_Y/Y_0	0,47	0,18	0,22	1,07
Вероятность p_Y^D некачественного формирования шва	1,7 %	0	0	14 %

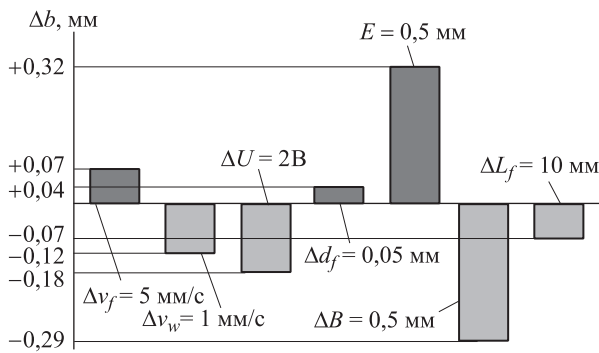


Рис. 2. Вклад нестабильности отдельных параметров процесса сварки в узкую разделку в глубину провара боковой стенки разделки на границе предшествующего слоя

ется межслойный непровар (размер $b = 0$) боковой стенки разделки в зоне сопряжения в предшествующим наплавленным слоем.

Высокая вероятность несплавления или межслойного непровара у боковой стенки разделки может быть обусловлена суммарной нестабильностью всех значимых параметров процесса сварки, однако вклад каждого из них при этом будет различен (рис. 2).

Диаграмма, приведенная на рис. 2, наглядно показывает, что наиболее значимыми причинами высокой вероятности несплавления у кромок являются неточность базирования электрода относительно плоскости симметрии стыка и погрешности в сборке стыка. Менее значимы напряжение дуги и скорость сварки.

Наиболее простым способом уменьшения вероятности возникновения несплавления у кромок разделки является увеличение глубины проплавления ее боковой стенки до значения $b_0 > 2S_b$. В рассматриваемом случае нужно увеличить b_0 от полученного значения $b_0 = 0,57 \text{ мм}$ до $b_0 > 1,0 \text{ мм}$, что требует повышения погонной энергии. Следует отметить: анализ выполнен при допущении, что предыдущий слой получен с горизонтальной поверхностью (см. рис. 1, б). Если эта поверхность выпуклая, то указанную глубину проплавления необходимо увеличить на высоту выпуклости G предыдущего слоя. Уменьшить вероятность возникновения несплавления и межслойных непроваров можно, повысив требования к качеству сборки стыка и точности оборудования. Однако при этом возникает проблема выбора параметров, стабильность которых целесообразно повысить, и задача расчета допусков на эти параметры.

Допуски на отклонения параметров сварки можно определить, решая обратную задачу оценки вероятности возникновения дефектов.

Целесообразность введения контроля значений того или иного параметра определяется на основе анализа вклада нестабильностей различных параметров в рассеяние значений показателей качества.

Введение контроля целесообразно, если нестабильность всех значимых параметров сварки может привести к недопустимому отклонению одного из показателей качества формирования шва, т. е. при выполнении условия по вероятности соответствия значений показателя качества допуску:

$$p_Y < p_0, \quad (4)$$

где p_0 — доверительная (требуемая) вероятность соответствия значений показателя качества допуску.

Если указанное соотношение не выполняется, то следует выявить параметры X сварки, значение которых нужно контролировать. Для этого определяются допустимое рассеяние S_D , при котором выполняется соотношение

$$\Phi\left(\frac{Y_{D1} - Y_0}{S_D}\right) + \Phi\left(\frac{Y_{D2} - Y_0}{S_D}\right) = p_0. \quad (5)$$

В технических расчетах обычно принимают доверительную вероятность $p_0 = 0,95$. В рассматриваемом случае на основании формул (2), (3) при одностороннем ограничении глубины проплавления $b > 0$, с учетом формул (2) и (3) получим $\Phi(b_0/S_D) + 0,5 = 0,95$, соответственно

$$S_D = b_0/1,65 = 0,27 \text{ мм}. \quad (6)$$

Задача определения допусков на различные параметры сварки неоднозначна, поскольку дефекты возникают вследствие взаимодействия множества факторов, по-разному влияющих на размеры шва. Для получения однозначного решения нужно ввести дополнительное условие, например, приняв, что все параметры, для которых определяется допуск, вызывают равные отклонения глубины проплавления.

Для выявления параметров процесса, рассеяние которых необходимо ограничить допусками, необходимо решать вариационную задачу

$$\sqrt{\sum_{X=1}^m \min^2(S_Y, S_0)} \xrightarrow{S_0 \Leftrightarrow \text{var}} S_D, \quad (7)$$

где S_0 — неизвестный уровень рассеяния, при котором сумма (7) равна допускаемому уровню отклонения параметра S_D от исходных требований, например, по глубине проплавления.

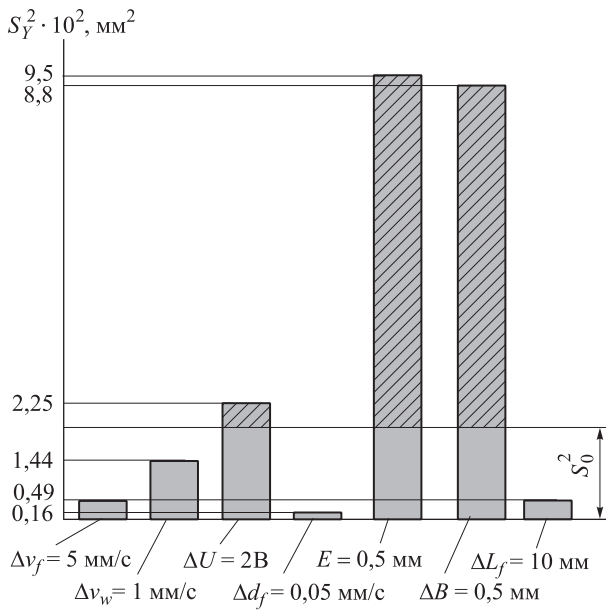


Рис. 3. Диаграмма, отражающая решение задачи отбора параметров для ограничения их допусками

Процедуру решения вариационной задачи (7) иллюстрирует диаграмма, приведенная на рис. 3.

Решение этой задачи сводится к определению уровня допустимого рассеяния S_0^2 , при котором сумма слагаемых $S_Y^2 < S_0^2$ (заштриховано) не превышает значения S_D^2 . Ограничение S_0 вводится для того, чтобы сумма высот столбцов диаграммы (см. рис. 3) не превышала S_D . Поиск величины этого ограничения описывается, как вариационная процедура (7). В данном конкретном случае соотношение (7) выполняется при $S_0 = 0,14$ мм, т. е. отклонение любого из параметров не должно вызывать изменения глубины проплавления более чем на 0,14 мм. Это требование выполняется для нестабильности скоростей сварки и подачи электродной проволоки, для допуска на ее диаметр и возможных отклонений вылета электрода.

Однако возможная нестабильность выходного напряжения источника питания, а особенно возможные погрешности сборки стыка и расположения электрода в зауженной разделке, этому требованию не удовлетворяют. Допуски D_X на отклонения последних можно определить по отношениям, связывающим указанные параметры с глубиной проплавления стенки разделки: $D_X < S_0 \Delta X / \Delta b$ (см. табл. 2). Соответственно, допустимая погрешность расположения электрода $D_E < 0,16 \cdot 0,5 / 0,32 = 0,25$ мм, требуемая погрешность сборки стыка $D_B < 0,16 \cdot 0,6 / 0,29 = 0,33$ мм, погрешность под-

держания напряжения дуги $D_U < 0,16 \cdot 2 / 0,18 = 0,18$ В.

Полученные результаты расчета качественно согласуются с результатами экспериментального исследования влияния параметров режима многопроходной сварки на формирование отдельных слоев в узком зазоре [5, 8].

Следует отметить, что установленные допуски на параметры сварки сильно зависят от номинального значения проплавления слоя металла предыдущего прохода у стенки разделки. В случае, когда эта глубина превышает среднеквадратичное отклонение проплавления, обусловленное нестабильностью параметров сварки, более чем вдвое, естественное отклонение параметров сварки (см. табл. 1) не может вызвать появление дефектов формирования швов, поэтому и исчезает необходимость контроля значений параметров и назначения допусков. Однако режим сварки с повышенным проплавлением вызывает чрезмерный переплав предыдущего слоя и значительно увеличивает расход энергии.

Выводы

1. При реализации технологии необходимо учитывать возможные погрешности параметров сварки, которые влияют на размеры шва и могут приводить к возникновению недопустимых дефектов шва

2. Главными дефектами формирования шва при сварке по узкому зазору являются несплавления у кромок и непровар боковой стенки разделки в зоне предшествующего слоя. Вероятность их возникновения которых определяется стабильностью глубины проплавления разделки в указанной зоне.

3. Стабильность проплавления и других размеров шва оценивается значением их отклонения, обусловленного множеством отклонений параметров процесса сварки, влияние которых можно воспроизвести путем численного моделирования формирования шва.

4. Вероятность возникновения дефектов формирования швов, в том числе межслойных несплавлений и непроваров у кромки разделки, можно оценить по отношению разности номинального и предельно-допустимого значений проплавления к его отклонению вследствие нестабильности параметров сварки с помощью функции Лапласа.

5. Избежать появления несплавлений и межслойных непроваров при многопроходной дуговой сварке по узкому зазору можно при вы-

боре параметров процесса, при которых глубина проплавления слоя металла предыдущего прохода у стенки разделки не менее чем вдвое превышает среднеквадратичное отклонение проплавления, вызываемое нестабильностью параметров сварки

б. Допуски на отклонения параметров свар-

ки можно определить, решая обратную задачу по оценке вероятности возникновения дефектов. Для получения однозначного решения следует ввести дополнительное условие, например, приняв, что все параметры, для которых определяется допуск, вызывают равные отклонения глубины проплавления.

Литература

- [1] Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Оськин И.Э., Полосков С.И. Моделирование особенностей формирования шва при сварке плавящимся электродом по узкому зазору. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2013, № 2, с. 11–16.
- [2] Тарарычкин И.А. Статистические критерии оценки качества продукции и состояния сварочных технологических процессов. *Тяжелое машиностроение*, 2008, № 9, с. 23–26.
- [3] Рыбачук А.М., Чернышов Г.Г. Распределение сварочного тока в изделии и ванне при дуговой сварке. *Сварка и Диагностика*, 2011, № 6, с. 16–20.
- [4] Papritan J.C., Helzer S.C. Statistical process control for welding. *Welding Journal*, 1991, vol. 70, no. 3, pp. 44–48.
- [5] Тарарычкин И.А. Исследование влияния параметров режима многопроходной сварки на формирование отдельных слоев в узком зазоре. *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2001, № 2(36), с. 190–194.
- [6] Ono H., Obata R., Teramoto T., Matsuda T. Observation of Penetration Shapes in Narrow-gap MAG Welding. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 1983, vol. 1, no. 1, pp. 83–90.
- [7] Ерофеев В.А. Решение задач оптимизации технологии на основе компьютерного моделирования процесса сварки. *Сварочное производство*, 2003, № 7, с. 19–26.
- [8] Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Компьютерный анализ особенностей заполнения разделки при двухдуговой сварке плавящимся электродом по узкому зазору. *Сварка и Диагностика*, 2013, № 3, с. 14–19.
- [9] Волченко В.Н. *Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов*. Москва, Изд-во стандартов, 1974. 158 с.
- [10] Ozelik S., Moore K., Naidu D.S. *Modeling, sensing and control of Gas Metal Arc Welding*. Oxford, Elsevier Science Ltd., 2003. 372 p.

References

- [1] Sholokhov M.A., Erofeev V.A., Os'kin I.E., Poloskov S.I. Modelirovanie osobennostei formirovaniia shva pri svarke plaviashchimsia elektrodom po uzkomu zazoru [Modeling of weld formation at consumable electrode welding through narrow gaps]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Procuring production in mechanical engineering]. 2013, no. 2, pp. 11–16.
- [2] Tararychkin I.A. Statisticheskie kriterii otsenki kachestva produktsii i sostoianiia svarochnykh tekhnologicheskikh protsessov [Statistical criteria of an estimation of quality of production and condition of welding technological processes]. *Tiazheloe mashinostroenie* [Russian Journal of Heavy Machinery]. 2008, no. 9, pp. 23–26.
- [3] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Raspredelenie svarochnogo toka v izdelii i vanne pri dugovoi svarke [Welding current distribution within the unit and the molting pool during the arc welding]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2011, no. 6, pp. 16–20.
- [4] Papritan J.C., Helzer S.C. Statistical process control for welding. *Welding Journal*, 1991, vol. 70, no. 3, pp. 44–48.
- [5] Tararychkin I.A. Issledovanie vlianiia parametrov rezhima mnogoprokhodnoi svarki na formirovanie ot del'nykh sloev v uzkom zazore [Investigation of the effect of mode parameters on the formation of a multipass welding of the individual layers in a narrow gap]. *Visnik Shidnoukraiïnskogo natsional'nogo universitetu* [Bulletin Shidnoukraiïnskoho National University]. 2001, no. 2(36), pp. 190–194.

- [6] Ono H., Obata R., Teramoto T., Matsuda T. Observation of Penetration Shapes in Narrow-gap MAG Welding. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 1983, vol. 1, no. 1, pp. 83–90.
- [7] Erofeev V.A. Reshenie zadach optimizatsii tekhnologii na osnove komp'yuternogo modelirovaniia protsessa svarki [Problem solving optimization technology based on computer simulation of the welding process]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2003, no. 7, pp. 19–26.
- [8] Sholokhov M.A., Erofeev V.A., Poloskov S.I. Komp'yuternyi analiz osobennosti zapolneniia razdelki pri dvukhdugovoi svarke plaviashchimsia elektrodom po uzkomu zazoru [Computer analysis of filling of cutting with twin-arc welding with consumable electrode through a narrow gap]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2013, no. 3, pp. 14–19.
- [9] Volchenko V.N. *Otsenka i kontrol' kachestva svarnykh soedinenii s primeneniem statisticheskikh metodov* [Evaluation and quality control of welded joints using statistical methods]. Moscow, Standartinform publ., 1974. 158 p.
- [10] Ozcelik S., Moore K., Naidu D.S. *Modeling, sensing and control of Gas Metal Arc Welding*. Oxford, Elsevier Science Ltd., 2003. 372 p.

Статья поступила в редакцию 15.04.2015

Информация об авторах

ШОЛОХОВ Михаил Александрович (Верхняя Пышма) — кандидат технических наук, директор ООО «ШТОРМ» (624093, Верхняя Пышма, Свердловская обл., Российская Федерация, Бажова ул., д. 28, e-mail: shmihael@yandex.ru).

ЕРОФЕЕВ Владимир Александрович (Тула) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Сварка, литье и технология конструкционных материалов». Тульский государственный университет (300012, Тула, Российская Федерация, Ленина пр., д. 92, e-mail: va_erofeev@mail.ru).

ПОЛОСКОВ Сергей Иосифович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: si_poloskov@mail.ru).

Information about the authors

SHOLOKHOV Mikhail Aleksandrovich (Verkhnyaya Pyshma) — Candidate of Science (Eng.), Director of Storm LLC (624093, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, Russian Federation, Bazhov St., Bldg. 28, e-mail: shmihael@yandex.ru).

EROFEEV Vladimir Aleksandrovich (Tula) — Candidate of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Moulding and Technology of Construction Materials. Tula State University (300012, Tula, Russian Federation, Lenin Pr., Bldg. 92, email: va_erofeev@mail.ru).

POLOSKOV Sergey Iosifovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technologies of Welding and Diagnostics Department. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, email: si_poloskov@mail.ru).